

**Entwicklung eines teilautomatisierten  
Montagesystems für die Montage von  
kundenspezifischen Baugruppen durch die  
Mensch-Roboter-Kooperation**

Dissertation  
zur Erlangung des Grades  
des Doktors der Ingenieurwissenschaften  
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät  
der Universität des Saarlandes

von  
Aaron Geenen M.Eng.

Saarbrücken  
2019

Tag des Kolloquiums: 27.01.2020

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller

Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Stefan Seelecke

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Steffen Hau

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) in Saarbrücken.

An erster Stelle möchte ich meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Rainer Müller danken, der mich jeder Zeit bei der Durchführung dieser Arbeit unterstützt und mich mit seiner Erfahrung stets hilfreich begleitet hat.

Herrn Professor Dr.-Ing. Dirk Bähre danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens und für das gezeigte Interesse an meiner Arbeit.

Mein Dank gilt all meinen Kolleginnen und Kollegen am ZeMA für die tolle Zusammenarbeit und die hervorragende Unterstützung durch hilfreiche Anregungen und wertvollen Diskussionen bei der Erstellung meiner Dissertation. Mein besonderer Dank und meine Wertschätzung gilt dem Oberingenieur der Abteilung Montageverfahren und -automatisierung Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing (FH) Matthias Vette-Steinkamp und meinem langjährigen Projektkollegen Tobias Masiak M.Eng..

Ebenfalls möchte ich mich bei den studentischen Hilfskräften sowie bei den Studien- und Abschlussarbeitern bedanken. Speziell sei hier Merlin Köhler M.Sc. genannt, der durch seine herausragende mehrjährige Mitarbeit im Aufgabenfeld einen wichtigen Beitrag zum Erfolg der Arbeit beigetragen hat.

Auch möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Dipl.-Ing. Karl-Josef Schmitt der Firma Woll Maschinenbau (Saarbrücken) für die inhaltlichen Anregungen und hilfreichen Ratschläge während der Ausarbeitung dieser Arbeit bedanken.

Mein herzlichster Dank gilt meiner Verlobten Anna, die mich stets bei der Fertigstellung motivierte und das Verständnis auf den Verzicht viel gemeinsamer Stunden zeigte.

Mein ganz besonderer Dank aber gilt meinen Eltern Esther und Wolfgang, die mir meinen bisherigen Lebensweg ermöglichten und auch in schwierigen Zeiten immer für mich da waren und meinen Geschwistern Noreen und Vivien für die immerwährende Hilfe!





# Inhalt

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XIII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XV</b>
<b>Abstract</b>	<b>XVII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Aufgabenstellung	3
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Forschungsbedarf	5
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	8
<b>2 Stand der Technik in Forschung und Industrie</b>	<b>11</b>
2.1 Begriffserklärungen	11
2.1.1 Montage	11
2.1.2 Schweißtechnik	17
2.1.3 Industrieroboter	22
2.2 Mensch-Roboter-Kooperation	35
2.2.1 Spektrum der Mensch-Roboter-Kooperation	35
2.2.2 Prozessbeispiele einer sicheren Mensch-Roboter-Kooperation	36
2.2.3 Fazit der MRK-fähigen Robotersysteme	39
2.3 Schweißprozess im Sondermaschinenbau	41
2.3.1 Produktspektrum	42
2.3.2 Prozessvorstellung	44
2.3.3 Betriebsmittelspektrum von manuell bis automatisiert	50
2.4 Bewertung der Betriebsmittel im Sondermaschinenbau	56
<b>3 Entwicklung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes</b>	<b>59</b>
3.1 Randbedingungen für die Entwicklung des Schweißarbeitsplatzes	60
3.1.1 Auswahl einer kundenspezifischen Schweißkonstruktion	60
3.1.2 Fokus operativer Produktentstehungsprozess einer Schweißkonstruktion	62
3.2 Fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter	65
3.2.1 Beschreibung der Fähigkeiten zwischen Mensch und Roboter	67
3.2.2 Zuteilung der Aufgaben im Produktentstehungsprozess	69
3.3 Auslegung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes	70
3.3.1 Aufgabenteilung in einem teilautomatisierten Arbeitsplatz	73
3.3.2 Sichere Arbeitsplatzgestaltung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes	75

<b>4 Steuerungskonzept zur intuitiven Prozessentwicklung und Prozessführung</b>	<b>83</b>
4.1 Gestaltung des Bedienkonzeptes	83
4.1.1 Prozessplanung und Prozessentwicklung	86
4.1.2 Virtuelles Modell	90
4.1.3 Konfiguration	95
4.1.4 Mensch-Maschinen-Schnittstelle	102
4.1.5 Anpassung der Systemanforderungen	105
4.2 Messkonzept im teilautomatisierten Arbeitsplatz	107
4.2.1 Einmessen der Bezugskordinaten innerhalb der Konfiguration	111
4.2.2 Offline-Korrektur der Schweißnaht	115
4.2.3 Online-Korrektur der Schweißnaht	122
<b>5 Validierung des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes</b>	<b>129</b>
5.1 Funktionsweise	130
5.2 Beantwortung der Forschungsfrage	140
5.3 Übertragbarkeit des angepassten Steuerungskonzepts in die Flugzeugbranche	143
5.3.1 Angepasstes Steuerungskonzept für die Prozessentwicklung und Prozessführung in der Flugzeugbranche	146
5.3.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle auf dem betrieblichen Hallenboden	149
5.3.3 Fazit der Übertragbarkeit	151
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>153</b>
<b>Literaturangaben</b>	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<b>Anhang</b>	<b>xxv</b>
<b>Liste der veröffentlichten Teilergebnisse</b>	<b>xxvii</b>
<b>Im Rahmen der Dissertation betreute wissenschaftliche Arbeiten</b>	<b>xxix</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Anzahl der Industrieroboter pro 10.000 Mitarbeiter im produzierenden Gewerbe (ISIC rev.4: C) [5]	2
Abbildung 2	Herausforderungen eines produzierenden Unternehmens [10]	3
Abbildung 3	Grundaufgaben der Montage in fünf Klassen	12
Abbildung 4	Einflussfaktoren auf den Automatisierungsgrad (angelehnt an Lotter) [26]	15
Abbildung 5	Flexibilität und Wandlungsfähigkeit nach Nyhuis [34]	16
Abbildung 6	Übersicht der Metall-Schweißprozesse [39]	18
Abbildung 7	Grundprinzip des Metall-Schutzgasschweißen [41]	19
Abbildung 8	Funktionsprinzip des Wolfram-Inertgasschweißen [41]	20
Abbildung 9	Schweißpositionen nach DIN EN ISO 6947 [44]	21
Abbildung 10	Komponenten eines Industrieroboters	23
Abbildung 11	Unterschiedliche kinematische Strukturen eines Industrieroboters [21]	24
Abbildung 12	Gängige lokale Strukturen eines Industrieroboters [52]	25
Abbildung 13	Komponenten einer Robotersteuerung [53]	25
Abbildung 14	Programmierverfahren eines Industrieroboters [57]	27
Abbildung 15	Verschiedene Bewegungsarten eines Roboters [51]	28
Abbildung 16	Linear-Interpolation einer Schweißnaht	29
Abbildung 17	Beschreibung eines Punktes durch Vektoren	30
Abbildung 18	RPY-Notation eines körperfesten Koordinatensystems [58]	31
Abbildung 19	Darstellung der verschiedenen Koordinatensysteme	33
Abbildung 20	Verfahren der Vorwärts- und Rückwärtstransformation [58]	34
Abbildung 21	Übersicht einsetzbarer Sensorprinzipien für das vollmechanische Lichtbogen-schweißen [63]	34
Abbildung 22	Arbeitsräume von Mensch und Roboter [64]	35
Abbildung 23	Spektrum einer Mensch-Roboter-Kooperation [64]	36
Abbildung 24	Prozessbeispiele einer sicheren Mensch-Roboter-Kooperation [66]	37
Abbildung 25	Spektrum der Mobilität der Roboter in der Produktion: Plattform-, Linearachs- und Schnellspannsysteme	39

Abbildung 26	Bestimmung der Bezugskoordinatensysteme durch Stereokamera, Momenten-Sensorik und Lasertriangulationssensor	40
Abbildung 27	Herausforderung einer kundenspezifischen Auftragsfertigung im Sondermaschinenbau	42
Abbildung 28	Exemplarische Übersicht der Vielzahl an Schweißkonstruktionen [10, 77]	43
Abbildung 29	Verschiedene Produkte einer Schweißkonstruktion [10]	43
Abbildung 30	Schweißreihenfolge erfordert das Umlagern der Baugruppe am Arbeitsplatz	44
Abbildung 31	Anforderungen der Nahtvorbereitungen des Bauteilclusters [74]	45
Abbildung 32	Heften (links) und Abdichten (rechts) der Schweißkonstruktion am Vormontageplatz [10]	45
Abbildung 33	Schweißnaht setzen an der vorpositionierten Schweißkonstruktion [10]	46
Abbildung 34	Verzugsarten an der Baugruppe [48]	48
Abbildung 35	Beispiele für die Einteilung nach dem Grad der Mechanisierung [42]	50
Abbildung 36	Vereinfachter Aufbau einer vollautomatisierten Roboterschweißzelle zum MSG-Schweißen	51
Abbildung 37	Laserschweißarbeitsplatz Schunk PSM 400 [85]	53
Abbildung 38	Halbautomatisierter Roboterschweißplatz CoWelder – Migatronik Automation [86]	53
Abbildung 39	Vollautomatisierte Roboterschweißzelle der Firma Kuka „flexibleCube“ [87]	54
Abbildung 40	Vollautomatisierte Roboterschweißzelle mit externem Sensorsystem der Firma Servo-Robot GmbH [88]	55
Abbildung 41	Vollautomatisierte Roboterschweißzelle aus dem Forschungsbereich des Fraunhofer IPA [89]	56
Abbildung 42	Produkt-Prozess-Betriebsmittel [10]	59
Abbildung 43	Zielbild des teilautomatisierten Arbeitsplatzes am Beispiel eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes	60
Abbildung 44	Montageprozesse von hochwertigen Schweißkonstruktionen	61
Abbildung 45	Heften der Schweißkonstruktion für die jeweilige Schweißnaht	63

Abbildung 46	Ermitteln der Vorzugslage exemplarisch für die jeweilige Schweißnaht am Beispiel des Schweißbehälters	64
Abbildung 47	Planung einer fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter	67
Abbildung 48	Vergleich zwischen Mensch und Roboter beim Setzen von langen Schweißnähten	69
Abbildung 49	Visualisierung der Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter an der Schweißkonstruktion	70
Abbildung 50	Auslegung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes	71
Abbildung 51	Aufteilung von Arbeitsschritten innerhalb einer Arbeitsplatzgestaltung	74
Abbildung 52	Vorgehensweise einer CE-Kennzeichnung	76
Abbildung 53	Typenschild des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes mit CE-Kennzeichnung	79
Abbildung 54	Sicherheitsprinzipien für die sichere Arbeitsplatzgestaltung einer Mensch-Roboter-Kooperation [105 bis 108]	80
Abbildung 55	Entwicklung eines angepassten Bedienkonzeptes	84
Abbildung 56	Erweiterung der Funktionalitäten vorhandener CAD-Programme	86
Abbildung 57	Einfaches Dialog-Fenster für die Planung des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes	87
Abbildung 58	Festlegung einer Schweißnaht als Linie und als Spline auf der Oberfläche	88
Abbildung 59	Bestimmung der Pose des Prozesswerkzeugs an der jeweiligen Schweißnaht	89
Abbildung 60	Prozessspezifische Werkzeugstellung an der Schweißnaht	89
Abbildung 61	Kollisionsprüfung und Anpassung der Orientierung des Werkzeuges	90
Abbildung 62	Konfiguration und Prozessplanung eines Schweißarbeitsplatzes	91
Abbildung 63	Arbeitsraum Mensch und Roboter in einer Montagezelle	93
Abbildung 64	Visualisierung des virtuellen Modells an der Baugruppe	94
Abbildung 65	Vier bekannte Pixelkoordinaten auf der Bildebene des Projektors	99
Abbildung 66	Projektion der Pixelkoordinaten auf der Baugruppe	99
Abbildung 67	Geforderte Vorzugslage beim Schweißen der kundenspezifischen Baugruppe	100

Abbildung 68	Aufspannen eines Hilfsvektors für die Überprüfung der Vorzugslage	101
Abbildung 69	Überprüfung der Vorzugslage	102
Abbildung 70	Werkeranweisung im Sichtfeld des Werkers	103
Abbildung 71	Bedienerführung und Eingabemöglichkeiten im teilautomatisierten Arbeitsplatz	104
Abbildung 72	Visualisierung der Arbeitsschritte auf der Baugruppe mit Hilfe eines Bildprojektors	105
Abbildung 73	Grafische Benutzeroberfläche für die Bearbeitung des virtuellen Modells	106
Abbildung 74	Beschreibung des Funktionsumfangs im Menüpunkt Group Details	107
Abbildung 75	Anforderung eines Messkonzepts zur Erkennung von Abweichungen bei der kundenspezifischen Montage von Schweißkonstruktionen	108
Abbildung 76	Auslegung einer Toleranzkette für die Einhaltung von quantifizierbaren Merkmalen am Produkt	109
Abbildung 77	Mathematische Beziehung des Triangulationssensors im Weltkoordinatensystem	109
Abbildung 78	Automatische TCP-Kalibrierung eines robotergeführten Linientriangulations-sensors [112]	110
Abbildung 79	Korrektur des Bezugskoordinatensystems mit dem dreistufigen Messkonzept	111
Abbildung 80	Skizze zur Bestimmung des Bezugskoordinatensystems mit drei Punkten [21]	112
Abbildung 81	Hybrides Bestimmen des Bezugskoordinatensystems	114
Abbildung 82	Erkennung von Linien und Punkten an der realen Baugruppe	115
Abbildung 83	Auswertung der Sensordaten durch den k-Means Clustering Algorithmus	116
Abbildung 84	Bilden zweier Geraden aus einem Punktecluster	116
Abbildung 85	Maskierung der Messwerte zur Bestimmung des exakten Schnittpunktes	117
Abbildung 86	Bestimmen des exakten Schnittpunktes durch die Maskierung der Messdaten	117

Abbildung 87	Bestimmen der Orientierung der Baugruppe durch die 3-Punkte Methode	118
Abbildung 88	Anpassung der Orientierung der Baugruppe über die Einheitsvektoren	119
Abbildung 89	Bestimmung der Abweichung hinsichtlich der Translation zwischen virtueller und realer Baugruppe	120
Abbildung 90	Ermitteln der Längenänderung der jeweiligen Schweißnaht	121
Abbildung 91	Orientierung des Prozesswerkzeugs während der Online-Korrektur der Schweißnaht	122
Abbildung 92	Mögliche Verformung der Schweißnaht innerhalb der Online Korrektur	122
Abbildung 93	Vermessung der geometrischen Schweißnaht	123
Abbildung 94	Korrektur der Schweißnaht basierend auf zwei Messpunkten	124
Abbildung 95	Resultierende angepasste Schweißnaht nach der geometrischen Online-Korrektur	124
Abbildung 96	Vermessen der Längenänderung der Schweißnaht während der Online-Korrektur	125
Abbildung 97	Schweißnahtprofil	126
Abbildung 98	Berechnung der Volumenänderung einer Schweißnaht	127
Abbildung 99	Entwicklungsumgebung für die Montage von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen	129
Abbildung 100	Sicherheitsprinzip in der Betriebsart automatisiertes Schweißen	131
Abbildung 101	Steuerungskonzept für die Integration der mechatronischen Module eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes	133
Abbildung 102	Visuelle Assistenz am Schweißarbeitsplatz mittels dreidimensionaler Digitalbrille	134
Abbildung 103	Integration verschiedenster Eingabegeräte mittels TCP-IP	134
Abbildung 104	Benutzeroberfläche der App zur Interaktion mit der Entwicklungsumgebung	135
Abbildung 105	Anpassung der Vorhänge zur Anpassung des Informationsgehalts auf dem betrieblichen Hallenboden	136
Abbildung 106	Positionierung von Fenstern per Drag & Drop	137
Abbildung 107	Einstellmöglichkeiten zur Konfiguration der Projektion	137
Abbildung 108	Referenznaht für das Parametrieren der Schweißnaht	138

Abbildung 109	Einteilung der Naht in drei Phasen	138
Abbildung 110	Vorgang des Einfädelns (Phase 1)	139
Abbildung 111	Durchführung der Hauptnaht (Phase 2)	139
Abbildung 112	Vorgang des Ausfädelns (Phase 3)	140
Abbildung 113	Aufbau eines Passagierflugzeugs Airbus A350 [118]	144
Abbildung 114	Aufbau einer Flugzeugsektion [118]	145
Abbildung 115	Entwicklungsumgebung für das Abdichten eines Fußbodenquerträgers	146
Abbildung 116	Angepasstes Bedienkonzept für das Abdichten von Verbindungselementen am Fußbodenquerträger	147
Abbildung 117	Schnelle und einfache Zuweisung der Arbeitsinhalten an der Baugruppe	147
Abbildung 118	Grafische Benutzeroberfläche im teilautomatisierten Montagesystem für das Abdichten von Nieten am Fußbodenquerträger	149
Abbildung 119	Anpassung der Fußbodenträgervariante auf dem betrieblichen Hallenboden	150
Abbildung 120	Austausch an Bewegungsinformationen in einer sicheren MRK- Arbeitsplatzgestaltung	151



## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	Bemerkung
BW	butt weld	Stumpfnah
CE	Communauté Européenne	CE-Kennzeichnung
CP	Continuous Path	Bahnsteuerung bei Robotern
ERP	Enterprise-Resource-Planning	Warenwirtschaftssystem
EG	Europäischen Gemeinschaft	EG-Konformitätserklärung
FourByThree	Modularity, Safety, Usability, Efficiency bey Human-Robot- Collaboration	EU- Forschungsprojekt
FW	fillet weld	Kehlnaht
GPS	Global Positioning System	Globales Positionsbestimmungssystem
KMU	kleinere und mittlere Unternehmen	
MAG	Metall-Aktivgasschweißen	Schweißverfahren
MES	Manufacturing Execution System	Produktionsleitsystem
MIG	Metall-Inertgasschweißen	Schweißverfahren
MP	Multi Point	Multipunktsteuerung bei Robotern
MRK	Mensch-Roboter-Kooperation	
MSG	Metall-Schutzgasschweißen	Schweißverfahren
PA	Wannenposition	Schweißpositionen
PB	Horizontalposition	Schweißpositionen
PC	Querposition	Schweißpositionen
PD	Horizontalüberkopfposition	Schweißpositionen
PF	Steigposition	Schweißpositionen
PG	Fallposition	Schweißpositionen
PH	steigend schweißen	Schweißpositionen
PJ	fallend schweißen	Schweißpositionen
H-L045	Steigposition	Schweißpositionen
IFR	International Federation of Robotics	Internationaler Verband der Robotik

J-L045	Fallposition	Schweißpositionen
PTP	Point to Point	Punktsteuerung bei Robotern
R	Rotatorisch	
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung	REFA entwickelt Methoden zur betrieblichen Datenermittlung und zum Management
RPY	roll-pitch-yaw	Roll-Nick-Gier-Winkel (Eulerwinkel)
T	Translatorisch	
TCP	Tool Center Point	Werkzeugkoordinatensystem
TRSE	Teilautomatisierter Roboterschweißplatz für die Einzelfertigung	Regionales Forschungsprojekt Saarland
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	Deutscher technisch- wissenschaftlicher Verein
WIG	Wolfram-Inertgasschweißen	Schweißverfahren
WPQR	Welding Procedure Qualification Record	
WPS	Welding Procedure Specification	
ZeMA	Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik	Forschungsinstitut in Saarbrücken

## Formelzeichen

$\alpha$	Rotationsparameter um die Z-Achse
$\beta$	Rotationsparameter um die Y-Achse
$\gamma$	Rotationsparameter um die X-Achse
$\lambda$	Skalierungsfaktor
$\delta$	Drehwinkel/ Rotationswinkel
$A_i$	Aufgespannte Fläche im Schweißprozess
${}^iA_j$	Homogene Matrix
${}^iB_j$	Drehmatrix
$b_{11}$	Koeffizienten der Rotationsmatrix
$E$	extrinsische Matrix des Bildprojektors
$E$	Streckenenergie
$E: \overrightarrow{AR}$	Aufgespannte Ebene im $KS_{AR}$
${}^B\underline{e}_{TCP}$	Richtungsvektor im Bezugskordinatensystem $KS_B$
${}^{B\infty}\underline{e}_{TCP}(\lambda)$	Skalierter Richtungsvektor im Bezugskordinatensystem $KS_B$
${}^W\underline{e}_{B_Z}$	Einheitsvektor der Z-Achse des $KS_B$ bezüglich Welt KS
${}^W\underline{e}_{B_Y}$	Einheitsvektor der Y-Achse des $KS_B$ bezüglich Welt KS
${}^W\underline{e}_{B_X}$	Einheitsvektor der X-Achse des $KS_B$ bezüglich Welt KS
$f$	Effektive Brennweite
$g_{B_Y}$	Gerade entlang der Y-Achse des $KS_B$
$g_{B_X}$	Gerade entlang der X-Achse des $KS_B$
$I$	intrinsische Matrix des Bildprojektors
$I$	Schweißstrom
${}^{AR}\underline{z}$	Normalvektor der Ebene $E: \overrightarrow{AR}$
$O_j$	Ursprung des Koordinatensystems j
$O_i$	Ursprung des Koordinatensystems i
${}^B O_K$	Offline-Korrektur Bezugskordinatensystem

$\mathbf{P}$	Projektionsmatrix des Bildprojektors
${}^P\underline{r}_{P1}, \dots, {}^P\underline{r}_{P4}$	Vektoren für Pixelkoordinaten des Bildprojektors
${}^{AR}\underline{p}$	Ortsvektor der Ebene $E: \overrightarrow{AR}$
${}^i\underline{r}_P$	Ortsvektor im $KS_i$ zum Punkt P
${}^j\underline{r}_P$	Ortsvektor im $KS_j$ zum Punkt P
${}^i\underline{r}_{O_j, O_i}$	Verbindungsvektor zwischen $KS_i$ und $KS_j$
${}^{AR}\underline{r}_{R1}$	Ortsvektor im $KS_{AR}$ zum Punkt R1
$\mathbf{R}$	Rotationsmatrix des Bildprojektors
$s$	Bahnparameter
$S_i$	Schnittpunkt
$\underline{r}$	Translationsvektor des Bildprojektors
$t_{ij}$	Koeffizienten der Projektionsmatrix
$t_0$	Zeitpunkt $t = 0$
$t_2$	Zeitpunkt $t = 2$
$U$	Lichtbogenspannung
$v$	Geschwindigkeit
$\underline{w}_i$	Anfangslage
$\underline{w}_{i+1}$	Endlage
$\underline{w}(s)$	Geradengleichung
$\underline{w}'(s)$	Steigung der Schweißnaht
$\underline{w}''(s)$	Krümmung der Schweißnaht
${}^W\underline{r}_{P1P2}$	Verbindungsvektor zwischen Punkt 2 und Punkt 1 bezüglich $KS_W$
${}^{AR}\underline{x}$	Stützvektor der Ebene $E: \overrightarrow{AR}$
$x, y, z$	Kartesische Koordinaten
${}^W\underline{x}_{O_B, O_W}$	Koordinate der X -Achse des Ortsvektors
${}^W\underline{y}_{O_B, O_W}$	Koordinate der Y -Achse des Ortsvektors
${}^W\underline{z}_{O_B, O_W}$	Koordinate der Z -Achse des Ortsvektors

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Data: Prozessbezogene Merkmale des Produktes im virtuellen Modell	92
Tabelle 2	Bezug: Beschreibung der Koordinatensysteme im virtuellen Modell	92
Tabelle 3	Gruppen: Zuordnung der Merkmale im virtuellen Modell	93
Tabelle 4	TypeMapping: Die Bezeichner werden mit den entsprechenden Prozesstypen verknüpft	95
Tabelle 5	TypeAdvices: Prozesse mit spezifischer Vorbereitung bzw. Nachbereitung	95
Tabelle 6	Bases: Posendefinition der Komponenten	96



## Kurzfassung

Die Entwicklung der Produktionstechnik im Bereich der Handhabungstechnik verschafft Mensch und Roboter neue Aufgabenfelder in der Montage. In Unternehmen, deren Montage technischen und wirtschaftlichen Risiken unterliegt, bietet die bedarfsgerechte Teilautomatisierung von Montagearbeitsplätzen durch die Mensch-Roboter-Kooperation ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung und eine Erhöhung der Prozessfähigkeit.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag für die Produktivitätssteigerung im Produktentstehungsprozess von kundenspezifischen Baugruppen und stellt einen Leitfaden für die bedarfsgerechte Automatisierung der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter dar.

Ein Lösungsansatz für die Automatisierung ergibt sich durch die Entwicklung eines angepassten Steuerungskonzepts für die Prozessentwicklung und -führung. Ein weiterer Vorteil ist die Gestaltung des Bedienkonzeptes mit einem anforderungsgerechten Messkonzept, welches die Mitarbeiter durch Assistenzfunktionen im Produktionsumfeld unterstützt, um die Installations- und Inbetriebnahmezeiten eines teilautomatisierten Montagearbeitsplatzes erheblich zu verkürzen.

Anhand des Aufbaus einer Entwicklungsumgebung und der Erprobung im Produktionsumfeld werden die Funktionen des teilautomatisierten Arbeitsplatzes nachgewiesen und validiert. Die Steigerung der Produktivität im Sondermaschinenbau wird gegenüber dem Stand der Technik aufgezeigt und die Übertragbarkeit des Steuerungskonzepts in die Flugzeugbranche belegt.





## **Abstract**

The development of production technology in the field of handling technology has created new areas for an interaction of humans and robots in assembly. In companies whose assembly is subject to technical and economic risks, the needs-based partial automation of assembly systems through human-robot cooperation offers great potential for increasing efficiency and process capability.

This thesis contributes to the increase of productivity in the product development process of customer-specific assemblies and provides a guideline for the need-based automation of the cooperation between human and robot.

A solution approach for automation results from the development of an adapted control concept for process development and process control. A further advantage is the design of the operating concept with a measurement concept that meets the requirements and supports the employees with assistance functions in the production environment in order to considerably shorten the installation and commissioning times of a semi-automated assembly workstation.

The functions of the semi-automated workstation are verified and validated by setting up a development environment and testing it in the production setting. The increase in productivity in special machinery construction becomes evident when compared to the state of the art and the transferability of the control concept to the aircraft industry has been proven.

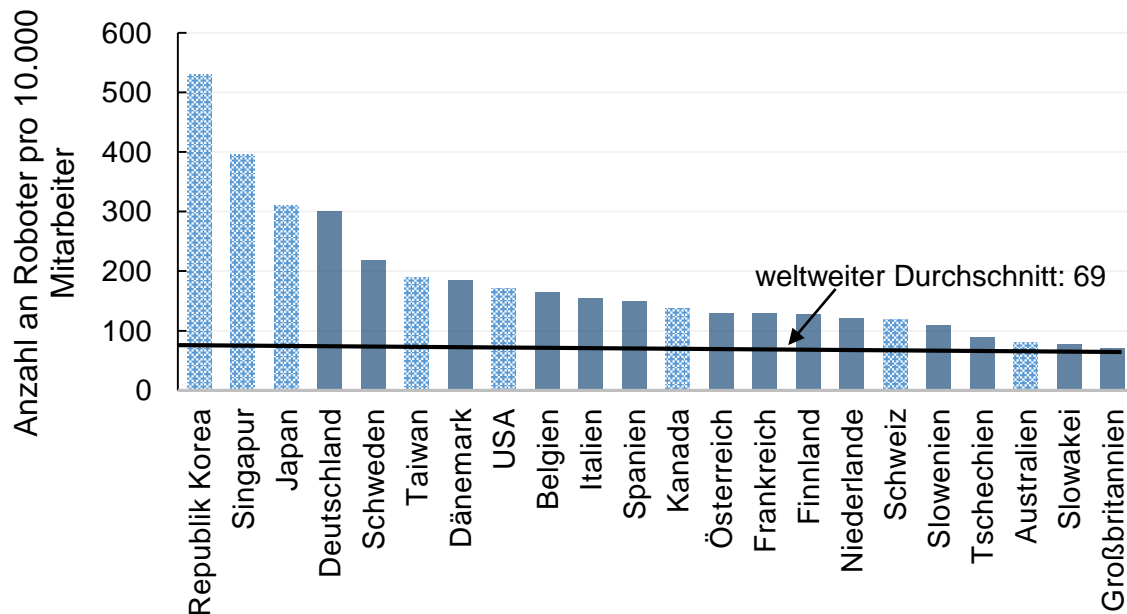


# 1 Einleitung

Nicht nur die Veränderung, bedingt durch den demografischen Wandel, sondern auch das wachsende Know-how in den Niedriglohnländern führt zu starkem internationalem Wettbewerb. Deutschland und Europa als Hochlohnstandort setzen verstärkt die Automatisierung zur Erhaltung und Steigerung der Produktivität ein. Das große Potential der stetig wachsenden Produktivität für eine effiziente und flexible Wertschöpfung ist die zunehmende industrielle Automatisierung [1].

Es hat sich jedoch gezeigt, dass der Trend der Hochautomatisierung nicht für ein wirtschaftliches Optimum spricht [2]. Ein wesentlicher Nachteil mit zunehmend steigendem Automatisierungsgrad ist die Inflexibilität der Produktionsanlagen [3]. Gerade die geforderte Flexibilität im Bereich der Montage, welche durch Umsatzenschwankungen und Produktionsumstellungen auf individualisierte Produktvarianten geprägt ist, kann nur mit einem hohen Kostenaufwand bei hochautomatisierten Anlagen realisiert werden [3]. Die Flexibilisierungskosten einer Hochautomatisierung sind oft auf unzureichende Analysen der manuellen Tätigkeiten zurückzuführen. Häufig werden die Erfahrungen und die Flexibilität der menschlichen Arbeitskraft nicht betrachtet und nicht für eine geeignete Mischung zwischen menschlichen und maschinellen Arbeitsinhalten gesorgt. [2]

Der vermehrte Einsatz von Industrierobotern in der Produktion, als zentrales Element der flexiblen Automatisierung, erscheint als unabkömmlich. Die Industrieroboter profitieren von technischen Innovationen, die sich in der Weiterentwicklung hinsichtlich der Leistungsfähigkeit, Fertigkeiten und Flexibilität der Roboter wirken [2]. Diese stetig verbesserte Robotertechnologie führt, neben einer signifikanten Marktdurchdringung, zu neuen Einsatzfeldern in der industriellen Automatisierung [4]. In einer Prognose des Weltbranchenverbandes International Federation of Robotics (IFR) im Jahre 2016 wurden weltweit mehr als 1,4 Millionen neue Industrieroboter bis im Jahre 2019 prognostiziert [5]. Die Gesamtanzahl der Industrieroboter weltweit würde somit auf 2,6 Millionen Einheiten wachsen [6]. Ein Auszug der IFR, erstellt im Jahre 2015 (Abbildung 1), veranschaulicht die hohe Anzahl an Robotern in Europa pro 10.000 Mitarbeiter im produzierenden Gewerbe, wie im International Standard Industrial Classification C Manufacturing (ISIC rev.4: C) beschrieben [5]. „Mehr als 65% der Länder mit einer überdurchschnittlichen Anzahl von Industrierobotern pro 10.000 Arbeitnehmer stammen aus der Europäischen Union“ [6].



**Abbildung 1** Anzahl der Industrieroboter pro 10.000 Mitarbeiter im produzierenden Gewerbe (ISIC rev.4: C) [5]

Laut Joe Gemma, Präsident der IFR, ist die flexible Automatisierung ein zentraler Wettbewerbsfaktor für große, aber auch zunehmend für kleine produzierende Unternehmen weltweit. Nur durch eine steigende Produktivität und die damit verbundene flexible Automatisierung kann ein positiver Effekt auf die Beschäftigung erzielt werden und langfristig Arbeits- und Ausbildungsplätze gesichert werden [5] [1].

Eine Form der flexiblen Automatisierung stellt die Zusammenarbeit zwischen einem Roboter und einem Menschen in einem gemeinsamen Arbeitsraum dar [7]. In der Literatur wird diese Form als Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) bezeichnet [8]. Der Vorteil dieser Zusammenarbeit besteht darin, dass die Erfahrung, Übersicht und Entscheidungskompetenz eines Menschen genutzt wird, um damit die Flexibilität der Industrieroboter zu erweitern. Der Roboter übernimmt die physisch anspruchsvollen, ermüdenden oder gefährlichen Arbeitsinhalte in einer MRK. [2]

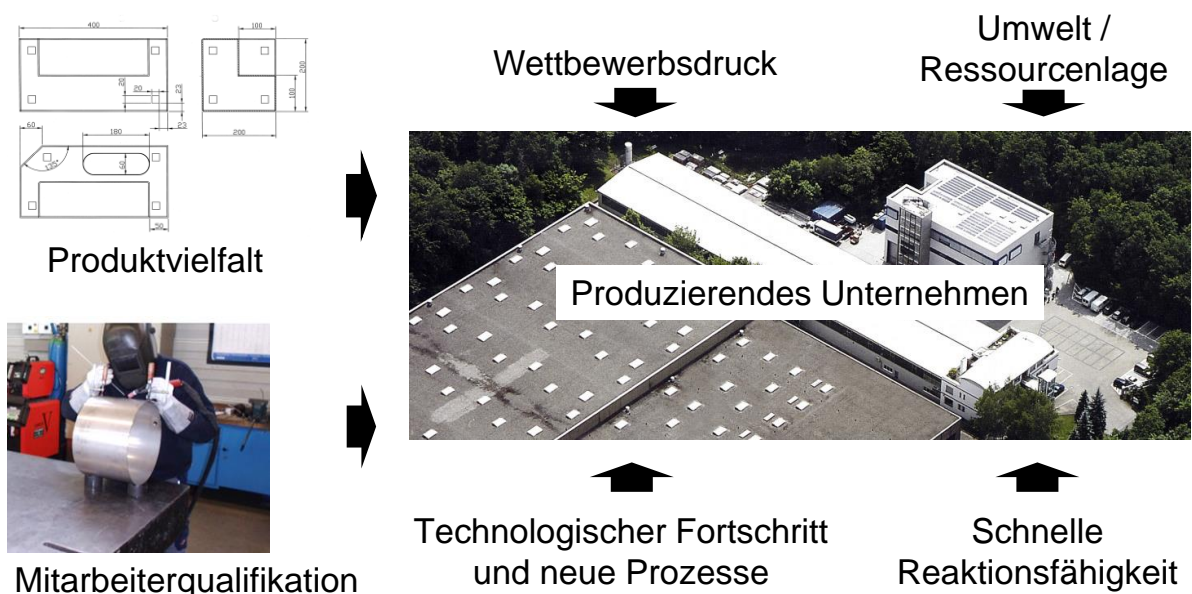
Durch die Eigenschaften der MRK ergibt sich das Potenzial der Kompensierung von fehlenden Facharbeitern, geschuldet durch den demografischen Wandel bzw. einen vermehrten Einsatz von leistungsgewandelten Mitarbeitern in der Produktion. Zusätzlich ergibt sich die innovative Möglichkeit, Prozesse in der Automatisierung flexibel und wirtschaftlich zu gestalten und somit die Konkurrenzfähigkeit von Hochlohnländern auch zukünftig sicherzustellen. [9]

## 1.1 Aufgabenstellung

Produzierende Gewerbe im In- und Ausland stellen oft Produkte für Kunden aus den verschiedensten Branchen (Automobilbranche, Luft- und Raumfahrtbranche, Schiffsbau, Medizinbranche, Lebensmittelbranche etc.) her.

Ein Produkt besteht meist aus verschiedenen Modulen, Baugruppen und Bauteilen. Dazu gehören unter anderem Prozessmodule, die dem Produkt die individuellen Eigenschaften verleihen. Die Prozessmodule setzen sich beispielsweise aus der Baugruppe mit integrierten Steuerungskomponenten und einer Vielzahl von Sensoren und Aktuatoren zusammen. Diese Prozessmodule müssen branchenspezifische Anforderungen erfüllen, sind oftmals einzigartig und erfordern eine individuelle Gestaltung. Dies setzt häufig die Entwicklung von speziellen Produktionsprozessen voraus, um der individuellen Gestaltung gerecht zu werden.

Der Entstehungsprozess eines kundenspezifischen Produktes unterliegt einer Vielzahl von Arbeitsschritten. Die sowohl inneren als auch äußeren Einflüssen (Abbildung 2) ausgesetzt sind. Der zunehmende Wettbewerbsdruck auf dem internationalen Markt, die steigenden Umweltauflagen und die Ressourcenverteilung an den jeweiligen Produktionsstandorten, die Ausgeglichenheit eines innovativen Unternehmens durch technologischen Fortschritt und neue Prozesstechnologien in Verbindung mit einer schnellen Reaktionsfähigkeit während des Produktentstehungsprozesses gehören zu den äußeren Einflüssen eines Sondermaschinenbaues.



**Abbildung 2 Herausforderungen eines produzierenden Unternehmens [10]**

Zu den inneren Einflüssen gehört unter anderem die hohe Anzahl an Varianten und geringe Losgrößen, welche eine Herausforderung besonders in der Fügetechnik darstellen. Gerade das Fügen von prozessrelevanten Verbindungen im Bereich von

Automotive, Medizin, Lebensmittel und Druckbehälter erfordert höchste Qualitätsansprüche der Fügeverbindung. Insbesondere kleinere Unternehmen haben oft Erfahrung mit speziellen und manuellen Fügeprozessen in der Entstehung von kundenspezifischen Baugruppen.

Aufgrund der hohen Lohnkosten stehen die etablierten Gewerbe mit ihren kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) unter enormen Kostendruck. Das wachsende Know-how in den Niedriglohnländern führt zu einem starken internationalen Wettbewerb. Produktvarianten und kleine Stückzahlen haben zur Folge, dass eine Vollautomatisierung von Prozessen entweder technisch nicht möglich oder häufig unwirtschaftlich ist. Hinzu kommt die fehlende Erfahrung der kleinen Unternehmen mit automatisierten Systemen, sodass diese nur begrenzt eingesetzt werden können.

Um im internationalen Wettbewerb kundenspezifische Produkte dauerhaft zu konkurrenzfähigen Kosten produzieren zu können, muss die Effizienz von Produktentstehungsprozessen kontinuierlich gesteigert werden. Durch eine bedarfsgerechte Teilautomatisierung von Arbeitsschritten können Produktionssysteme an die Anforderungen der kundenspezifischen Produkte und Prozesse angepasst werden und tragen somit zu einer effizienten Steigerung der Produktivität bei.

## **1.2 Zielsetzung**

Die Produktivität im produzierenden Unternehmen von kundenspezifischen Baugruppen kann durch die Entwicklung von teilautomatisierten Roboterarbeitsplätze gesteigert werden. Während in der Produktion von Baugruppen mit hohen Stückzahlen schon weit entwickelte roboterbasierte Systemlösungen existieren, müssen im Entstehungsprozess von Baugruppen mit kleinen Stückzahlen noch vergleichbare Systeme entwickelt werden.

Der zu entwickelnde teilautomatisierte Arbeitsplatz beinhaltet manuelle und automatisierte Arbeitsschritte, wozu eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter erforderlich ist. Die Entwicklung des teilautomatisierten Arbeitsplatzes bezieht sich auf die Fertigung von Bauteilen sowie auf die Montage der Bauteile und Baugruppen zu höherwertigen Baugruppen innerhalb des Produktentstehungsprozesses in der Produktion.

Die Herausforderung in einem solchen Arbeitsplatz liegt darin, eine bedarfsgerechte Automatisierung in einer kundenspezifischen Auftragslage zu gestalten. Der wesentliche Bestandteil des teilautomatisierten Arbeitsplatzes ist dabei der Mensch, welcher von der Planung bis zum Betrieb intelligent unterstützt werden muss.

Vergleichbare Arbeitsplätze im industriellen und wissenschaftlichen Umfeld zeigen, dass diese Produktionssysteme bislang die Aufteilung der Arbeitsschritte zwischen Mensch und Maschine von der Planung und Modellierung bis hin zum Produktionsprozess nicht beinhalten. Zwar verfügt die existierende Produktionstechnik teilweise über die erforderlichen Sensoren, was eine Inbetriebnahme der Systeme erleichtert, jedoch wird eine ganzheitliche Prozessplanung nicht berücksichtigt.

Es muss untersucht werden, ob die vorgestellten Technologieansätze dazu genutzt werden können, die Produktivität in einem Produktentstehungsprozess von kundenspezifischen Baugruppen im produzierenden Unternehmen zu steigern.

Die Entwicklung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes mit einer bedarfsgerechten Automatisierung in einer MRK lässt sich in zwei Forschungsfelder unterteilen:

- Konzeption eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes für kundenspezifische Baugruppen
- Angepasstes Steuerungskonzept für die intuitive Prozessentwicklung und Prozessführung

Die Forschungsfelder werden am Beispiel einer kundenspezifischen Baugruppe im Sondermaschinenbau entwickelt. Die Ergebnisse der entwickelten Methodik eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes sollen in einer Entwicklungsumgebung eines Schweißarbeitsplatzes implementiert und validiert werden.

Um eine Übertragbarkeit der entwickelten Methodik eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes zu gewährleisten, wird diese an einem weiteren Anwendungsbeispiel einer kundenspezifischen Baugruppe in der Flugzeugbranche ebenfalls implementiert und validiert.

### 1.3 Forschungsbedarf

#### **Konzeption eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes für kundenspezifische Baugruppen**

Das Aufgabenspektrum in der Montage von kundenspezifischen Baugruppen ist vielfältig und kann nicht durch ein vollautomatisiertes, überwiegend roboterbasiertes Montagesystem abgebildet werden. Besonders eine variantenreiche Montage erfordert die Anpassung der Montagesysteme. Die Anpassung und Programmierung der roboterbasierten Montagesysteme benötigt Expertenwissen im Bereich der Robotertechnologie, welches auf dem betrieblichen Hallenboden oft nur begrenzt vorhanden ist und von einem Facharbeiter nicht bereitgestellt werden kann. Die Prozessentwicklung von automatisierten Montagesystemen basiert auf einer Versuchsreihe, in der die erforderlichen Prozessparameter eingefahren werden müssen. Nicht nur die hohe Investition in Versuchsbaugruppen, sondern auch die langen Stillstandzeiten während der Prozessentwicklung führen zu einem nicht wirtschaftlichen Wertschöpfungsprozess in der Montage von kundenspezifischen Baugruppen. Ein großer Anteil der Montageaufgaben einer kundenspezifischen Baugruppe ist bislang durch manuelle Tätigkeiten geprägt. Die hohe Flexibilität und Qualifizierung der Facharbeiter kann in der Montage von Baugruppen mit komplexen Aufgaben und kurzen Arbeitsinhalten effizient genutzt werden. Bei langen Arbeitsinhalten oder monotonen Aufgaben ist eine nicht reproduzierbare Qualität in der Montage von kundenspezifischen Baugruppen erkennbar.

Daher stellen sich für die „Entwicklung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes für kundenspezifische Baugruppen“ folgende Fragen:

- Wie kann ein Arbeitsplatz gestaltet werden, der den Bedürfnissen gerecht wird?
- Wie lässt sich eine bedarfsgerechte Automatisierung von kundenspezifischen Baugruppen realisieren?
- Nach welchen Kriterien können Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter aufgeteilt werden und wie können diese in einen Arbeitsplatz eingebunden werden?
- Wie kann eine sichere Zusammenarbeit in einer MRK gewährleistet werden?

### **Angepasstes Steuerungskonzept für die intuitive Prozessentwicklung und Prozessführung**

Die bislang in der Fertigung und Montage etablierten Robotersysteme verfügen über eine starre Systemgestaltung, in der die erforderlichen Prozesstoleranzen durch hochgenaue Messtechnik und der Verwendung von speziellen Positioniervorrichtungen bereitgestellt werden. Eine Anpassung der Montagestation und die anschließende Wiederinbetriebnahme erfordert fundamentales Expertenwissen im Bereich der Robotik und ist in der Regel mit einem hohen Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Für die Entwicklung von Roboterapplikationen werden vermehrt simulationsbasierte Programmierverfahren eingesetzt. Jedoch entsprechen diese Programmierverfahren nicht den Bedürfnissen eines KMU. Einer der Hauptgründe sind unter anderem die hohen Anschaffungs- und Servicekosten, aber auch die Schulungen in (mächtigen) Softwareprogrammen. Desweiteren ermöglicht keines der bislang verfügbaren simulationsbasierten Roboterprogramme die Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine.

Neben der Konzeption eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes ist die Entwicklung eines Steuerungskonzeptes zur intuitiven Prozessentwicklung und -führung für die Montage von kundenspezifischen Baugruppen erforderlich.

Die zentrale Komponente einer bedarfsgerechten Automatisierung ist eine effiziente Steuerung und Programmierung der Montagestation. Die Anpassungsmöglichkeiten und schnelle Inbetriebnahme des teilautomatisierten Arbeitsplatzes erfordert die Integration von zusätzlichen mechatronischen Modulen und die Implementierung von geeigneten Messkonzepten, was zu einer zunehmenden Komplexität der Systemgestaltung führt. Die in dieser Arbeit entwickelte Konzeption besteht aus mehreren mechatronischen Modulen. Durch die mechatronische Modularisierung und Abgrenzung der jeweiligen Module des teilautomatisierten Arbeitsplatzes kann die Komplexität der Station verringert werden. Der Forschungsbedarf besteht neben der Identifizierung der Steuerung auch in der Programmierung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes in einer MRK.

Die resultierende Forschungsfrage lautet:

- Wie kann eine intuitive Prozessentwicklung und Prozessführung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes für die Montage von kundenspezifischen Baugruppen realisiert werden, die auf die Qualifikationen und Anforderungen der Facharbeiter in KMU zugeschnitten ist und somit keine



Roboterprogrammierkenntnisse voraussetzt, aber auch die Erfahrungen der Facharbeiter mit einfließen lässt?

Die Forschungsfrage wird in die Themenfelder Gestaltung eines Bedienkonzeptes und Messkonzept im teilautomatisierten Roboterplatz unterteilt.

### **Gestaltung des Bedienkonzeptes**

Die Montage von kundenspezifischen Baugruppen erfordert eine schnelle Reaktionsfähigkeit in der Produktion. Die vom Kunden bestellten Produkte befinden sich häufig in einem Prototypenstatus und werden kontinuierlich optimiert. Die Optimierung der Baugruppen führt in der Regel zu einer Anpassung der Montageaufgaben und/oder zu einer Änderung der Arbeitsinhalte. Das Nachführen von Optimierungen der bestellten Baugruppen in der Produktion erweist sich bislang als eine technische Herausforderung. Die Anpassung von bestehenden automatisierten Prozessabläufen an einem Arbeitsplatz ist meist nur durch die Unterstützung von hochqualifizierten Experten im Bereich der Programmierung möglich und somit oft nicht wirtschaftlich auf dem betrieblichen Hallenboden eines KMU realisierbar. Vor diesem Hintergrund werden folgende Forschungsfragen ergänzt:

- Wie kann das Bedienkonzept auf die Bedürfnisse von KMU zugeschnitten werden?
- Wie kann eine Kooperation zwischen Mensch und Maschine an die Gegebenheiten des betrieblichen Hallenbodens angepasst werden?
- Wie können bestehende Prozessabläufe an einem teilautomatisierten Arbeitsplatz wirtschaftlich angepasst werden, um eine schnelle Reaktionsfähigkeit in der Montage von kundenspezifischen Baugruppen bereitzustellen?

### **Messkonzept im teilautomatisierten Roboterplatz**

Aufbauend auf dem Steuerungs- und Bedienkonzept wird auch ein angepasstes Messkonzept benötigt. Die Gestaltung des Bedienkonzeptes sieht die Planung der Station mit einem virtuellen Modell vor. Das virtuelle Modell entspricht nicht der Realität. Eine direkte Übertragbarkeit von virtuellen Modellen auf das reale System ist nur bedingt möglich. Es liegen meist während der Inbetriebnahme und während des Prozessablaufs Abweichungen im System vor, welche die Anforderungen von kundenspezifischen Baugruppen nicht erfüllen. Eine vollständige Identifikation aller wichtigen Einflussgrößen für das Modell ist immer mit einem hohen Aufwand verbunden und kann nicht als Messkonzept für einen teilautomatisierten Roboterplatz genutzt werden. Gefordert ist eine schnelle und einfache Messstrategie, die sich in ein dreistufiges Messverfahren unterteilt. Das dreistufige Messverfahren muss je nach Anwendung von einer groben bis zu einer feinen Vermessung skalierbar sein. Dabei beinhaltet die erste Stufe die globale Vermessung der Station. Die Abweichungen der jeweiligen Montageaufgabe können über eine regionale Vermessung identifiziert werden und entsprechen der zweiten Stufe der zu entwickelnden Messstrategie. Die

im Prozessablauf resultierenden lokalen Abweichungen müssen über eine dritte Stufe innerhalb der Messstrategie bestimmt werden.

Folgende Forschungsfrage wird untersucht:

- Mit welcher Messstrategie kann eine Prozesssicherheit eines automatisierten Prozessablaufs gewährleistet werden?
- Wie kann eine dreistufige Messstrategie, unterteilt in globale, regionale und lokale Messverfahren, in einem teilautomatisierten Roboterplatz implementiert werden?
- Wie kann eine solche Messstrategie bei einem kleinen und mittleren Unternehmen wirtschaftlich eingesetzt werden?

## **1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit**

Die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit umfasst die Untersuchung und die Beantwortung der formulierten Forschungsfragen aus Kapitel 1.3. Aus der industriellen Praxis wird der Forschungsbedarf abgeleitet, sodass die Arbeit einem angewandten Forschungsansatz unterliegt. Der vorliegende Forschungsansatz setzt sich aus der Kombination von dargestellten Lösungsansätzen aus der Literatur und den aus der Industrie gesammelten Erfahrungen des Autors zusammen. Durch die Tätigkeiten in Forschungsprojekten zur roboterbasierten Montage von kundenspezifischen Baugruppen und in sich überlappenden Arbeitsräumen zwischen Mensch und Maschine wurden die gewählten Ansätze und Modelle innerhalb von Industriearbeitskreisen und auf Konferenzen diskutiert und kontinuierlich weiterentwickelt.

Die vorliegende Arbeit umfasst sechs Kapitel und ist in verschiedene Schwerpunkte aufgeteilt. Der Aufbau der Arbeit ist an die „Strategie angewandte Forschung“ von Ulrich [11] angelehnt. Die verwendete Struktur umfasst allgemein in Kapitel 1 die Thematik Automatisierung im produzierenden Gewerbe. Dabei wird die Problemstellung aus der industriellen Praxis konkret benannt. Neben der Beschreibung der Zielsetzung wird der Forschungsbedarf in dieser Arbeit formuliert.

Zur besseren Einstufung der Thematik wird in Kapitel 2 der aktuelle Stand der Technik in Forschung und Industrie erarbeitet. Darin wird das theoretische Umfeld der allgemeinen Grundlagen in der Produktionsforschung zum Themenverständnis detailliert erläutert. Die Entwicklung des teilautomatisierten Montagesystems wird am Beispiel einer kundenspezifischen Schweißkonstruktion konzipiert. Dafür werden neben den Begriffserklärungen in Kapitel 2.1 primär die Fügetechnologie Schweißen im Sondermaschinenbau und die technischen Aspekte der MRK im Bereich der Montage dargestellt. Der Schweißprozess im Sondermaschinenbau bildet die Grundlage der entwickelten Methodik der vorliegenden Arbeit. In einer Übersicht werden die bislang im Sondermaschinenbau verwendeten, automatisierten Produktionssysteme für die Montage vorgestellt. Es wird diskutiert, inwiefern die in der Produktionsforschung entwickelten Lösungsansätze auf die Montage von

kundenspezifischen Baugruppen übertragbar sind. Ergänzend werden im Kapitel 2.2 die Grundlagen der MRK erläutert, um anschließend eine Klassifizierung der am Markt erhältlichen Robotersysteme zu ermöglichen. Anhand der beschriebenen Beispiele aus Industrie und Forschung erfolgt die Benennung der Teilaufgaben und die Präzisierung des Handlungsbedarfs.

In Kapitel 3 werden relevante Anwendungszusammenhänge, Gestaltungsregeln und Gestaltungsmodelle für die Entwicklung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes erarbeitet. Abschließend wird ein Steuerungsmodell eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes entwickelt. Dieses bildet die Grundlage des Kapitels 4 „Steuerungskonzept zur intuitiven Prozessentwicklung und Prozessführung“.

Anhand der vorliegenden Herausforderungen wird die Spezifikation der relevanten Teilfunktionen und der methodische Entwurf einer intuitiven Prozessentwicklung und -führung aufgezeigt. Im Bereich des intuitiven Bedienens im Kapitel 4.1 wird die resultierende Methodik über das Planen und über das Generieren eines virtuellen Modells bis hin zur prozesssicheren Montage einer kundenspezifischen Baugruppe hergeleitet. Die Gestaltung der Modellierung von virtuellen und realen Modellen erfordert eine Messstrategie, welche in Kapitel 4.2 entwickelt und an die Herausforderungen eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes angepasst wird.

Die Validierung des teilautomatisierten Arbeitsplatzes sowie die Bewertung des Systems nach den Erkenntnissen und dem definierten Handlungsbedarf stellen die Schwerpunkte des Kapitels 5 dar. In Anlehnung an Kapitel 3 und Kapitel 4 wird die Übertragbarkeit der entwickelten Methoden zur flexiblen Automatisierung in der Flugzeugbranche validiert.

Die Arbeit schließt mit einem zusammenfassenden Kapitel, in dem die wesentlichen Erkenntnisse und Aussagen zusammengefasst und künftige Aufgabenstellungen sowie Erweiterungen des Forschungsraums dargestellt werden.



## 2 Stand der Technik in Forschung und Industrie

Um die Entwicklung eines teilautomatisierten Montagesystems für die Montage von kundenspezifischen Baugruppen am Beispiel eines Sondermaschinenbaus zu bewerten, wird in diesem Kapitel die Montage, das Schweißverfahren, die Grundlagen der Industrieroboter, die Grundlagen der MRK, vorhandene Produkte, Prozesse und Betriebsmittel im Sondermaschinenbau beleuchtet.

Durch die Bewertung der Betriebsmittel im Sondermaschinenbau wird das Kapitel Stand der Technik abgeschlossen und die Anforderungen für einen teilautomatisierten Schweißarbeitsarbeitsplatz abgeleitet.

### 2.1 Begriffserklärungen

Die Arbeit entstand am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik, geleitet von Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller mit seinem Lehrstuhl im Bereich der Montagetechnik und im Rahmen der Projektierung der Forschungsprojekte „Modularity, Safety, Usability, Efficiency by Human-Robot-Collaboration (FourByThree)“ und „Teilautomatisierter Roboterschweißplatz für die Einzelteillfertigung (TRSE)“, welche durch Mittel der Europäischen Kommission und des Saarlandes gefördert wurden. Die Erklärung der Fachbegriffe ist daher an die Definitionen des Lehrstuhls und der Literatur angelehnt.

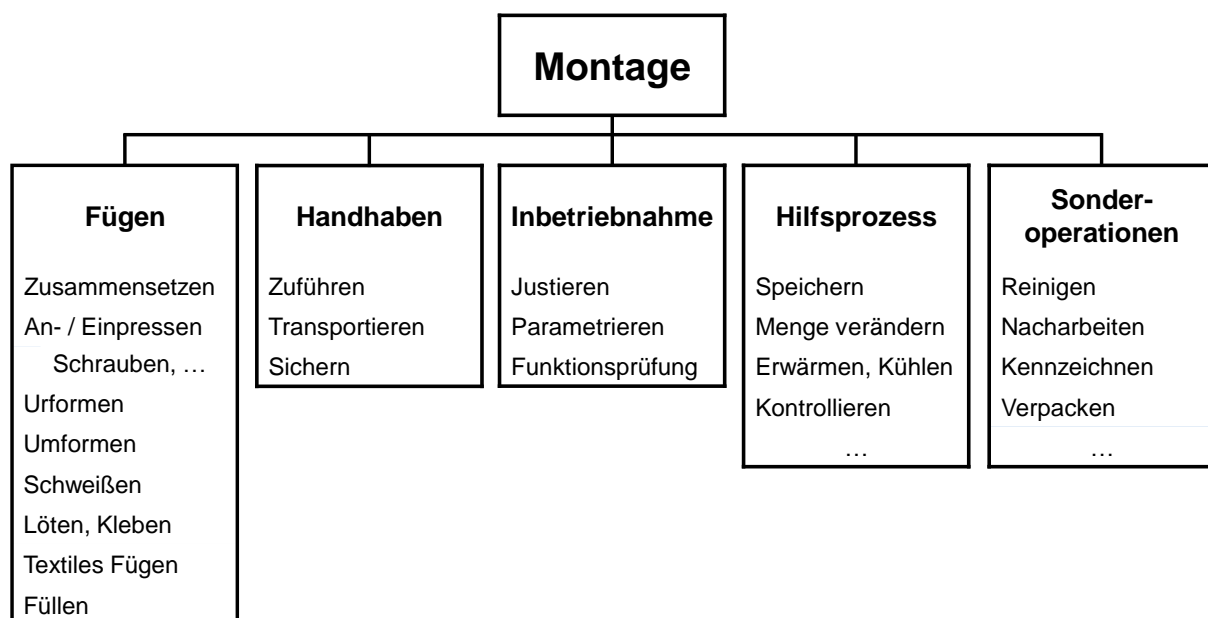
#### 2.1.1 Montage

Die Definition von Montage ist in der Literatur und den dazugehörigen Normen und Richtlinien nicht eindeutig beschrieben. Gerade die Einordnung der Montage wird unter anderem in der Deutschen Industrienorm (DIN) 8593, aber auch im Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2815 und VDI 2860 mit dem Begriff **Fügen** in Verbindung gesetzt [12] [13] [14]. Folgewidrig erfolgt die Zuordnung der Montage als Teil der Fertigung bzw. Herstellung, welche neben einer reinen Teilfertigung häufig mit dem Oberbegriff der **Produktion** benannt wird. Jedoch untergliedert der Produktentstehungsprozess eine Vielzahl von Funktionen und Bereiche, die sich von der Entwicklung und Konstruktion über die Produktionsplanung und -steuerung bis hin zur Inbetriebnahme ausdehnen [15]. Das Ziel der Unterteilung der Funktionen und Bereichen ist die Beschreibung der Entwicklung und Herstellung eines Produktes [15]. Die Uneinigkeit besteht weiterhin in der Bedeutung der Begrifflichkeiten, sodass im Sprachgebrauch, gestützt durch moderne Literatur [16] [17] [18] (Lotter & Wiendahl, Montage in der industriellen Produktion, 2013), die Montage als ein Bereich innerhalb der Produktion gekennzeichnet wird.

Der Vorgang der industriellen **Montage** wird in der Richtlinie VDI 2815 [13] als „Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen in der Fertigung“ [13] beschrieben. Darin versteht sich die Montage als fundamentaler Bestandteil jeglicher industriellen Produktion, sofern deren Produkte aus mehreren Einzelteilen bestehen [16]. Der planmäßige Zusammenbau

der jeweiligen Produkte erfolgt in der Regel in Montagestationen, welche die Betriebsmittel und die dazugehörigen Montageprozesse bereitstellen.

Die Montage ist einer der letzten Schritte in der Wertschöpfungskette der Produktion. Störungen und Fehler aus vorliegenden Produktionsabläufen müssen identifiziert und kompensiert werden, was eine besondere Herausforderung in der Montage darstellt. Neben dem Zusammenbau bzw. Fügen von Bauteilen sind noch weitere Aufgabenumfänge erforderlich, um die an das Produkt gestellte Funktion und Qualität bereitstellen zu können. Die Montage kann auf fünf Grundaufgaben reduziert werden. In Anlehnung an die Fachliteratur gliedert Rainer Müller an seinem Lehrstuhl für Montagetechnik die Grundaufgaben der Montage in fünf Klassen [19]. Die Abbildung 3 veranschaulicht die Unterteilung der Aufgaben der Montage in Fügen, Handhaben, Inbetriebnahme, Hilfsprozesse und Sonderoperationen.



**Abbildung 3** Grundaufgaben der Montage in fünf Klassen

Das **Fügen** beschreibt „das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt.“ [12]. Zu den klassischen Fügeverfahren gehören unter anderem das Schrauben, das Schweißen und das Fügen durch Zusammensetzen. Durch die Verwendung von neuen Werkstoffen, wie z.B. Faserverbundwerkstoffen, kommt vermehrt das Laserscanner-Schweißen, das Hydroforming und das Kleben als innovative Fügeverfahren in der Montage zum Einsatz [20].

Die technische Beschreibung des **Handhabens** in der Montage beinhaltet das Zuführen, Transportieren und Sichern von Bauteilen und/oder -gruppen. Das Zuführen

beschreibt die Bereitstellung der Montageobjekte sowie das Bereitstellen von Hilfsfügeteilen in einem definierten Ordnungszustand am Ort der geplanten Montageoperation. Der erforderliche Ordnungszustand wird durch die Anforderungen der Montageoperation gekennzeichnet und beschreibt die Position und Orientierung des zugeführten Objekts im Montageprozess. Das Transportieren von Teilen oder Baugruppen beinhaltet das Bewegen zwischen den einzelnen Arbeitsplätzen bzw. Prozessstationen. Die Funktion **Sichern** bzw. Entsichern im Handhabungsprozess ermöglicht das Verhindern bzw. Freigeben von Bewegungsoperationen während den erforderlichen Transport-, Zuführ- und den Fügeoperationen.

„Die **Inbetriebnahme** umfasst alle Tätigkeiten, die das zusammengebaute Modul oder Produkt entsprechend den Vorgaben in einen betriebsfähigen Zustand versetzt“ [16] und lässt sich in das Parametrieren, das Justieren und in die Funktionsprüfung unterteilen. Das gezielte Übergeben und Einspeichern von Konfigurationswerten in eine Steuerung, die für den Betrieb der Funktionalitäten dringend erforderlich ist, wird als Parametrieren bezeichnet. Die Parametrierung versteht sich auch als die elektronische Inbetriebnahme des Produktes. Neben der Parametrierung beinhaltet die Justage einen geplanten Einstellprozess, der die Funktionalität des Produktes bereitstellt. Ein wesentlicher Bestandteil der Inbetriebnahme ist die Funktionsprüfung des Produktes und stellt alle grundlegenden Funktionalitäten sowie die Erfüllung der Produktspezifikationen in der Montage sicher. [16]

**Hilfsprozesse** sind für die primären Tätigkeiten in der Montage notwendig, wobei mit den Hilfsprozessen kein direkter Montagefortschritt erzielt wird. Die Hilfsprozesse sind unter anderem das Speichern und Kontrollieren von Bauteilen in der Montage, die keine Wertsteigerung des Produktes erzeugen [16].

Im Gegensatz zu Hilfsprozessen gehören die **Sonderoperationen** zu den wertsteigernden Tätigkeiten. Sonderoperationen sind alle Grundfunktionen, die weder dem Fügen, dem Handhaben noch der Inbetriebnahme zugeordnet werden können. Ein Beispiel für eine solche Operation ist das Kennzeichnen und das Verpacken von Bauteilen in der Montage.

## Montageplanung

Unter der Montageplanung versteht man im Allgemeinen die Auslegung des Montagesystems und deren Einzelfunktionen zur Montage des Produktes sowie die Anpassung aufeinanderfolgender Aufgaben in der Montage [16, 21]. In der Literatur wird eine Vielzahl an etablierten Planungsmethoden beschrieben. Meist wird der Ansatz verfolgt, die Planung in mehrere Phasen zu unterteilen. Vereinzelt beruhen die Planungsansätze auf der Richtlinie VDI 2222 der Konstruktionsmethodik [22], aber auch auf einer mehrstufigen Methodik in Anlehnung an die entwickelten Methoden zur betrieblichen Datenermittlung und zum Management des REFA-Verbandes (REFA = Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung). Zu den etablierten Planungsmethoden von mehrstufigen, unterteilten Phasen der Montage gehören unter anderem der Lösungsansatz nach Konold und Reger [23] oder

der Ansatz nach Lotter [18]. Darin sind die Ansätze der Montageplanung im Aufbau der Methoden meist ähnlicher Art [21]. Der Anfang der Planungsphase besteht in der Aufnahme der Montageaufgaben und in der Analyse der Randbedingungen. Resultierend aus der Bestandsaufnahme wird ein Montagekonzept abgeleitet. Solche Zielsysteme beinhalten alle notwendigen Kennzahlen und Kriterien zur Bewertung der entwickelten Montagekonzepte. Darin erfolgt die Konzeption der Montagesysteme in zwei Entwicklungsschritten, auch bekannt unter der Grob- und Feinplanung eines Montagesystems. In der Grobplanung findet die Gegenüberstellung von verschiedenen Systemen unter den Anforderungen des Zielsystems statt. Die bevorzugten Montagekonzepte werden anschließend in einer Feinplanung detailliert ausgearbeitet. Dabei unterscheidet sich die Detaillierung der Konzeption je nach Planungsmethodik. Die Konzeption beinhaltet einzelne Systemkomponenten wie Arbeitsplätze, Betriebsmittel, Organisationsform, Grad der Automatisierung usw. sowie die Anordnung der Systeme im Montagelayout [24]. Anhand einer Wirtschaftlichkeitsrechnung findet eine Abschätzung der notwendigen Investitionen statt. Die Festlegung der Arbeitsinhalte und die daraus resultierenden Ergebnisse sowie die vorliegenden weiteren Daten (wie Lohnkosten, Lohngruppen usw.) ergeben die zeitabhängigen Arbeitskosten des jeweiligen Montagesystems [24]. Mittels einer Bewertung wird das optimale Montagesystem ausgewählt. Hierbei werden neben den Kosten auch die Nutzeraspekte bewertet. Vor der finalen Realisierung des Montagesystems werden für die Gestaltung der manuellen Montagesysteme und automatisierten Montagesysteme Modelle zur Veranschaulichung und Erprobung der Konzepte erstellt. Für die Modellierung von manuellen Konzepten wird zum Beispiel Cardboard Engineering verwendet, bei dem mittels Kartonagenschachteln Arbeitsplätze abgebildet werden. Wohingegen bei der Modellierung von automatisierten Konzepten meist auf softwaregestützte Entwicklungsumgebungen und Simulationen zurückgegriffen wird. Nach der Optimierungsphase des Montagesystems durch die Modellierung erfolgt die Realisierung und Dokumentation.

### **Automatisierungstechnik, Automatisierung, Automatisierungsgrad**

Die **Automatisierungstechnik** beschreibt alle Schritte, die für eine Automatisierung der Montageanlage erforderlich sind und beinhaltet unter anderem die Bereiche Maschinenbau und Elektrotechnik. Darüber hinaus ist vermehrt eine maschinelle Informationsverarbeitung zur Steuerung der Anlage und bereitstellen von Produktionsdaten notwendig.

Generell versteht sich unter der **Automatisierung** das selbstständige Ablaufen eines Programmes in einem System, in das nicht eingegriffen werden muss. Dabei gibt es viele Definitionen für die Automatisierung in der Forschung und Industrie. Eine etablierte Beschreibungsform der Automatisierung aus dem internationalen elektronischen Wörterbuch nach DIN IEC 60050-351 lautet: „Selbsttätig bzw. automatisch ist ein Prozess oder eine Einrichtung, der oder die unter festgelegten Bedingungen ohne menschliches Eingreifen abläuft oder arbeitet.“ [25].



Im Allgemeinen lässt sich eine Montageanlage durch einen **Automatisierungsgrad** beschreiben. Der Automatisierungsgrad beschreibt die Komplexität und somit den Anteil automatisierter Funktionen in einer Montageanlage. Der Grad der Automatisierung bezeichnet prozentual die automatisierten Tätigkeiten in der Montage. Demzufolge wird bei einem Automatisierungsgrad von 100% von einer vollautomatisierten Montage gesprochen und von einer rein manuell geprägten Montage, wenn der Automatisierungsgrad bei 0% liegt.

Die Abbildung 4 [26] veranschaulicht die Kriterien für die Auswahl des geeigneten Automatisierungsgrads. Für die Montage von variantenreichen Produkten im unteren Stückzahlsegment eignet sich vor allem die manuelle Montage. Wohingegen eine wirtschaftliche Vollautomatisierung meist durch starre Systeme mit möglichst langen Laufzeiten geprägt ist und im Gegensatz zur manuellen Montage keine hohe Flexibilität bereitstellt. Neben der strikten Trennung zwischen manuellen und automatisierten Montageanlagen gibt es auch sinnvolle Lösungsansätze, die beide kombinieren. Derartige Ansätze werden als „hybride“ bzw. teilautomatisierte Systeme bezeichnet [26].

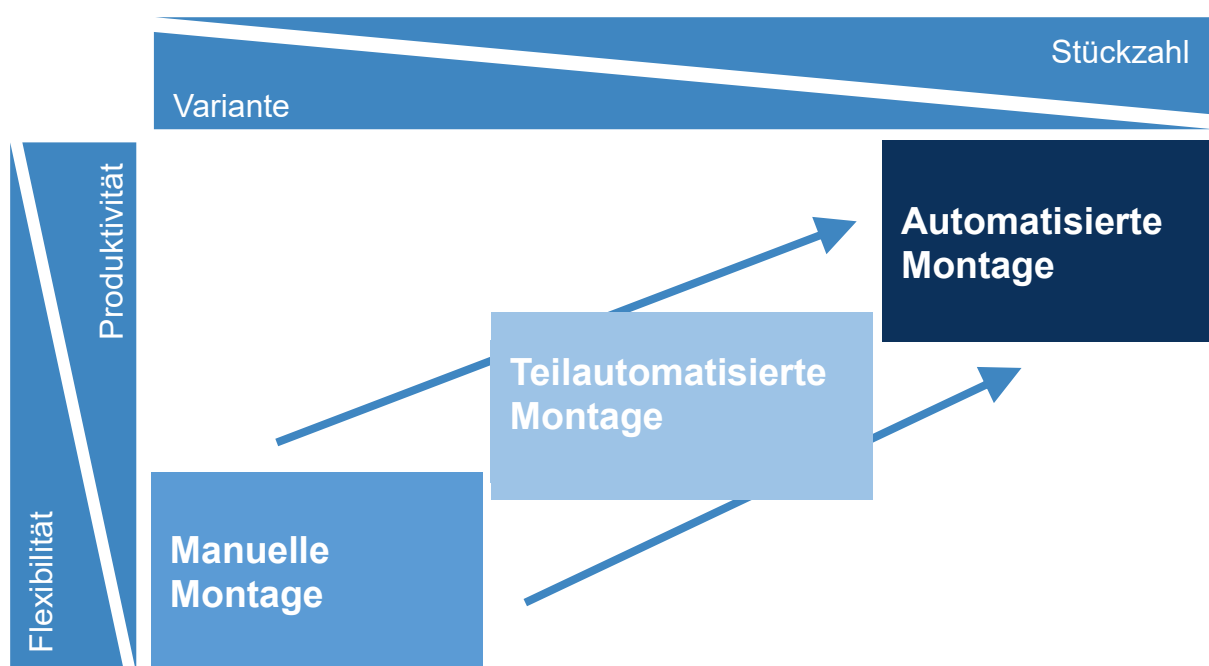


Abbildung 4 Einflussfaktoren auf den Automatisierungsgrad (angelehnt an Lotter) [26]

### Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Rekonfiguration

„Die **Flexibilität** beschreibt die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell und nur mit sehr geringem finanziellen Aufwand an geänderte Einflussfaktoren anzupassen“ [27]. Dabei können Einflussfaktoren wie beispielsweise Stückzahlen, Kosten, Lieferzeit, Prozessqualität oder die Kombination dieser Kennzahlen die Flexibilität eines Montagesystems beeinflussen [28]. Die Anpassungsfähigkeit eines

Montagesystems wird in der Planungsphase der Systemauslegung aufgrund von Investitionsaufwand begrenzt und kann somit nicht beliebig erweitert werden.

„Die **Wandlungsfähigkeit** wird als Potenzial verstanden, neue Flexibilitätskorridore in Bezug auf Organisation und Technik bei einem geringen Investitionsaufwand zu ermöglichen“ [29]. Das bedeutet, dass die Wandlungsfähigkeit in einer gewissen Abhängigkeit zur Flexibilität steht [19]. Jedoch fallen im Gegensatz zu der Flexibilität bei der Wandlungsfähigkeit erst weitere Investitionskosten an, wenn das Montagesystem auf die sich ändernden Einflussfaktoren angepasst wird [27]. Die Prozessfähigkeit des Wandels stellt die Wandlungsfähigkeit eines Montagesystems dar [30]. Dabei werden alle möglichen Anforderungen eines wandlungsfähigen Montagesystems nur im Vorfeld durchdacht, um somit bei einer Implementierung keine expliziten Grenzen aufzuzeigen, diese sind weitestgehend lösungsneutral [31][21].

Die Autoren Nyhuis und Reinhart veranschaulichen in der Abbildung 5 die wesentlichen Unterschiede zwischen der Flexibilität und der Wandlungsfähigkeit. Die in der Produktion herrschenden Veränderungen sind auf einer Zeitachse aufgetragen. Darin ist erkennbar, dass sich die Flexibilität (in der Abbildung als graue Bandbreite) in begrenzten Dimensionen und Szenarien bewegt. Liegen die Veränderungen außerhalb der begrenzten Dimensionen, ist ein Wandeln des Montagesystems erforderlich. Ein solcher Vorgang ist zum Zeitpunkt  $t_2$  erforderlich und führt zu einer Verschiebung der Dimension. Die Verschiebung der Dimension wird in der Literatur als Wandlungsfähigkeit beschrieben. [32, 33]

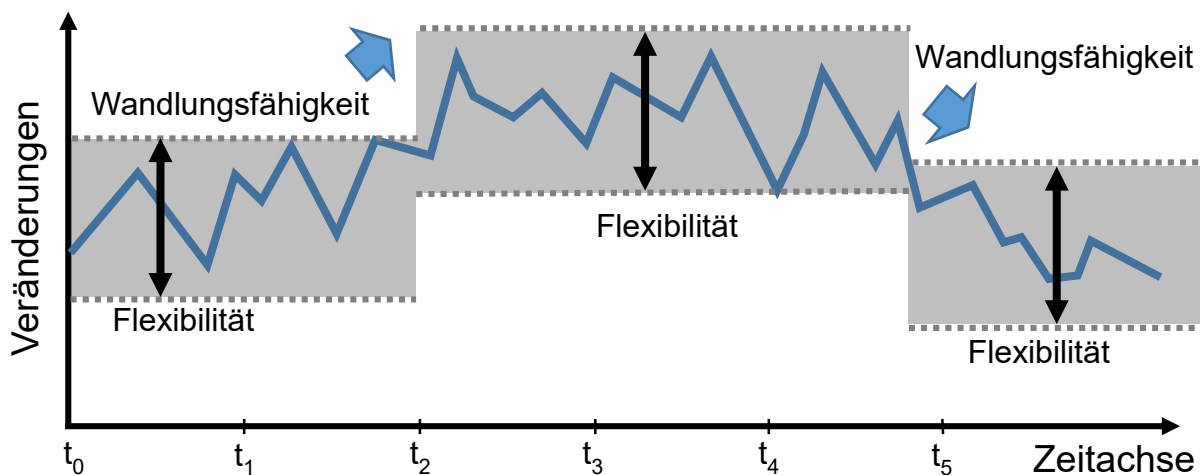


Abbildung 5 Flexibilität und Wandlungsfähigkeit nach Nyhuis [34]

Unter der **Rekonfigurierbarkeit** versteht sich die Anpassung des Produktionssystems auf Veränderungen in kurzer Zeit und mit möglichst geringem Aufwand [21]. Bei einem Montagesystem sollen Module ausgetauscht werden können, jedoch nicht durch gleichartige ersetzt werden. Das Ersetzen der Module kann manuell aber auch

automatisiert erfolgen [35]. Im Gegensatz zu einem Service bzw. einer Reparatur des Montagesystems können die Module mit neuen Eigenschaften erweitert werden [36].

Die fünf zentralen Merkmale der Rekonfigurierbarkeit sind Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Wandlungsfähigkeit. Die Universalität des Produktionssystems deckt die Produkthanforderungen ab. In der Regel werden die Module [35, 37, 38], welche eine gewisse Mobilität aufzeigen, als spezialisierte Funktionseinheiten bezeichnet, die für definierte Aufgaben in der Montage eingesetzt werden. Die Modularität eines Systems wird durch standardisierte funktionsfähige Module bereitgestellt. Durch die Vernetzungsfähigkeit kann die Kompatibilität eines Produktionssystems modular gestaltet werden.

Im Hinblick auf die Wandlungsfähigkeit können universelle Montagesysteme, durch den Ansatz der Rekonfigurierbarkeit, schnell zu spezialisierten Montagesystemen gewandelt werden, worin jede Funktionseinheit über eine gewisse Flexibilität verfügt [27].

### 2.1.2 Schweißtechnik

Die Definition der **Schweißtechnik** beinhaltet die Summe und Erfahrungen, die von den Fachleuten für die Anwendung von schweißtechnischen Prozessen erarbeitet und zusammengetragen worden sind [39, 40]. Die wesentlichen Eigenschaften einer Schweißverbindung werden überwiegend durch den Wärmeeintrag an der Fügefläche und der Auskristallisierung der Schweißschmelze gekennzeichnet, welche maßgeblich durch den Werkstoff, das Schweißverfahren und die Konstruktion beeinflusst werden [39].

Das **Schweißen** wird als Vorgang beschrieben, bei dem der Werkstoff/ die Werkstoffe durch das Wirken von Wärmeenergie und/oder Druck dauerhaft verbunden werden. Je nach Schweißverfahren, können verschiedene Schweißzusätze mit gleicher Schmelztemperatur zugeführt werden. Bei der Verwendung von Schweißzusätzen wird in Verbindungsschweißen und Auftragsschweißen unterschieden. Beim Verbindungsschweißen werden maßgeblich artgleiche Schweißzusätze verwendet [41]. Wohingegen sich beim Auftragsschweißen die chemische Zusammensetzung einer Schicht durch die Verwendung von unterschiedlichen Metallen als Schweißzusatz verändert. Durch die Veränderung der chemischen Zusammensetzung können beispielsweise „höhere Korrosions- oder Verschleißwiderstände sowie gegebenenfalls größere Hitzebeständigkeiten gegenüber dem Grundwerkstoff“ [39] erzielt werden. Die resultierende Schweißverbindung ist die Schweißnaht. [39, 41]

In der Abbildung 6 werden die verschiedenen Metallschweißprozesse gezeigt. Das Metallschweißen ist unterteilt in Schmelz-Schweißen und Press-Schweißen. Das Schmelz-Schweißen beinhaltet einen Schweißprozess, indem die Fügeflächen durch ein Aufschmelzen verbunden werden. Dabei können Schweißzusätze verwendet werden. Im Press-Schweißprozess werden durch das Einleiten einer äußeren Kraft die Fügeflächen plastisch verformt und im Bereich der Plastifizierung eine

Fügeverbindung hergestellt. Gewöhnlich werden die zu fügenden Werkstückflächen lokal erhitzt, um den Vorgang zu erleichtern.

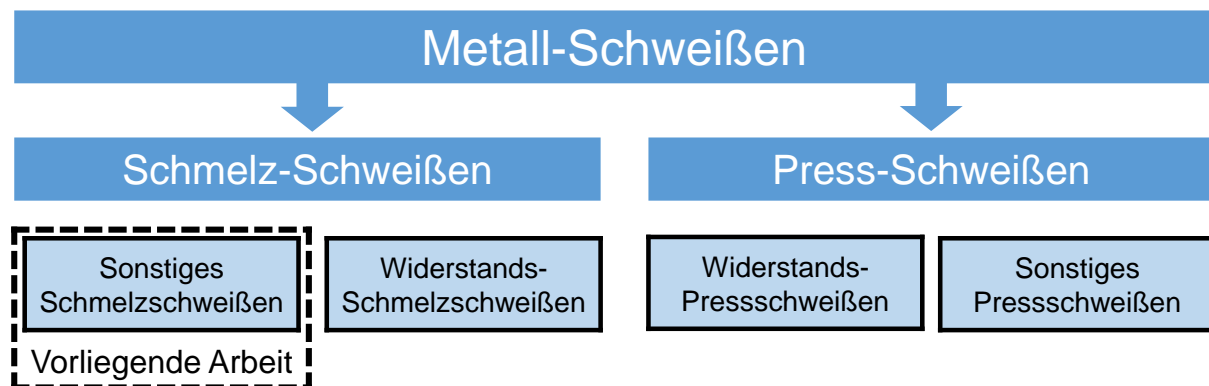


Abbildung 6 Übersicht der Metall-Schweißprozesse [39]

Die vorliegende Arbeit bezieht sich ausschließlich auf die Metall-Schmelzprozesse im Bereich „Sonstiges Schmelzschweißen“ [42]. In Betracht gezogene Schweißverfahren sind hierbei das Schweißen mit Metall-Schutzgas und Wolfram-Inertgas. Diese Verfahrensprinzipien werden im Folgenden anhand der Funktionsweise beschrieben.

Bei dem **Metall-Schutzgasschweißen**, häufig in der Literatur als MSG-Schweißen abgekürzt, wird ein Lichtbogen zwischen einer Kathode und einer Anode erzeugt. In der Abbildung 7 wird das Grundprinzip des MSG-Schweißens veranschaulicht. Die Kathode als Pluspol ist eine abschmelzende Elektrode und die Anode als Minuspol die zu schweißende Baugruppe. Die Elektrode fungiert als Schweißzusatz, welcher je nach Schweißprozess in unterschiedlichen Drahtdurchmessern von 0,8 bis 1,6 mm nachgeführt wird. Der Lichtbogen wird durch eine Stromquelle erzeugt und bewirkt das Abschmelzen des Endlosdrahts sowie das Aufschmelzen des Grundwerkstoffs an den Fügestößen der Baugruppe. Durch das Zuführen eines Schutzgases beim Ab- bzw. Aufschmelzvorgang werden das Korrodieren und das Bilden von Poren im Schmelzbad unterbunden. Das Schutzgas schirmt den Schweißprozess von der Umgebungsluft ab, um eine Reaktion des Metalls mit dem Sauerstoff in der Luft zu verhindern. Nach DIN 1910-100 [42] stehen im Schweißverfahren MSG-Schweißen verschiedene Schutzgasarten zur Verfügung, welche innerhalb des Verfahrens in Metall-Aktivgasschweißen (MAG-Schweißen) und in Metall-Inertgasschweißen (MIG-Schweißen) unterteilt werden. Die Auswahl des geeigneten Schutzgases erfolgt in Abstimmung mit Grund- und Zusatzwerkstoff. Um unerwünschte Reaktionen im Schweißprozess **MIG-Schweißen** zu vermeiden, werden ausschließlich inerte Gase eingeleitet. Häufig verwendete inerte Gase sind Edelgase, wie Argon und Helium, aber auch die Kombination aus beiden in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen. Definiert und beschrieben werden diese und weitere inerte Gase in der Norm DIN EN ISO 14175 in der Hauptgruppe 1 der Schutzgase. Im Gegensatz zum MIG-Schweißen werden im **MAG-Schweißen** Schutzgasgemische eingesetzt mit aktiven

Bestandteilen, sofern der Grund- und Zusatzwerkstoff dies zulässt. Die aktiven Gase werden neben der Schutzfunktion als Prozessgase verwendet, die auf die Eigenschaften des Schweißprozesses, auf den Lichtbogen und das Schmelzbad, positiv einwirken. Hauptsächlich werden Gasmischungen mit unterschiedlichen Anteilen an Argon, Helium, Sauerstoff, Kohlenstoff und Wasserstoff verwendet, wohingegen meist eine argonreiche Gasmischung eingesetzt wird. Dies lässt sich auf besonders gute technische Eigenschaften und geringe Kosten des Gases Argon zurückführen. Die genauen Beschreibungen der jeweiligen aktiven Mischgase findet sich in der Norm „Schweißzusätze - Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse“ [43] in den Hauptgruppen M1-3 und C. [39, 41]

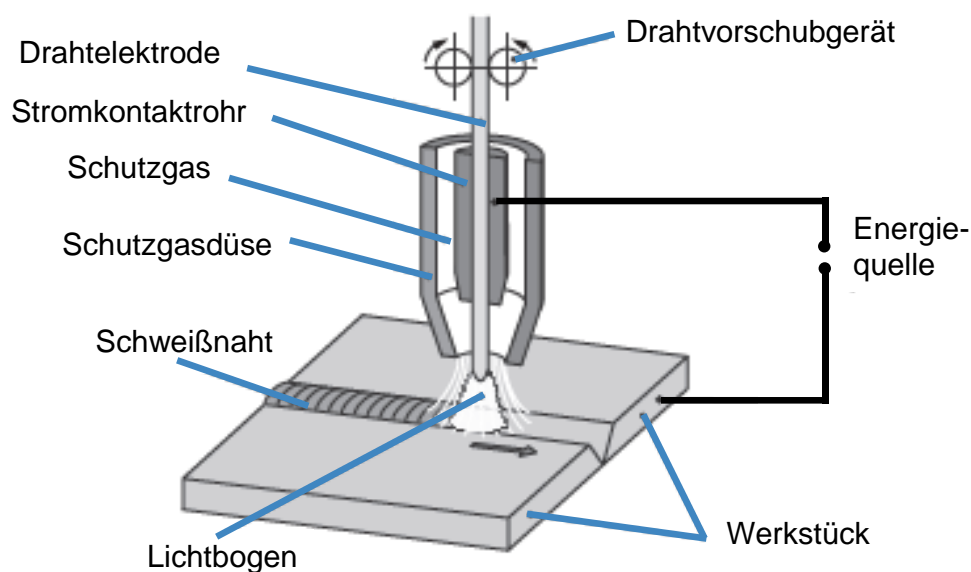
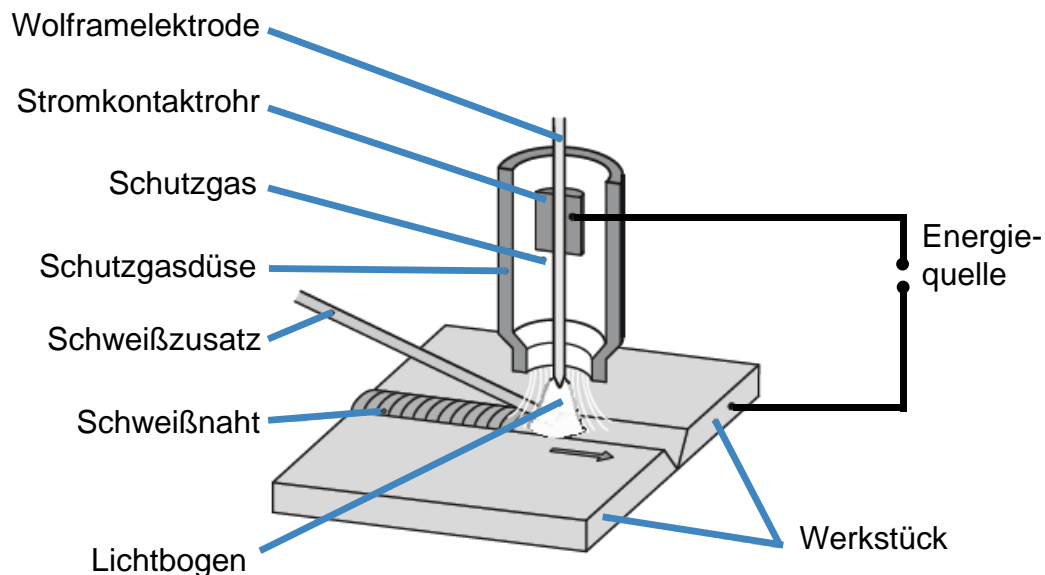


Abbildung 7 Grundprinzip des Metall-Schutzgasschweißens [41]

Die Stromquelle zur Erzeugung des Lichtbogens kann in der Regel als Gleichstromquelle oder als pulsierende Stromquelle eingesetzt werden. Der mit einem Drahtvorschubgerät geführte Schweißdraht wird im Stromkontaktröhre mit der Stromquelle kontaktiert. Die Zuführung von Schweißdraht, Schutzgas und weiteren Medien erfolgt über ein Schlauchpaket vom Drahtvorschubgerät bis zum Schweißbrenner. Das Schutzgas wird im Brenner über eine Schutzgasdüse, eine konisch geformte Geometrie, gezielt dem Schweißprozess zugeführt. [41]

Beim **Wolfram-Inertgasschweißen** (WIG-Schweißen) wird ein Lichtbogen zwischen einer Wolframnadel und der Baugruppe gezündet. Eine schematische Darstellung des WIG-Schweißens ist in Abbildung 8 erkennbar. Die feststehende Nadel dient als Anode (Pluspol) und die zu schweißende Baugruppe als Kathode (Minuspole). Der Lichtbogen wird, wie auch bei anderen MSG-Schweißens, mit einem Schutzgas umströmt. Das Zuführen des Schutzgases erfolgt über eine Keramikdüse und dient als eine kontinuierliche Gasglocke über dem Lichtbogen. Der über eine Hochfrequenz

gezündete Lichtbogen fungiert als Wärmequelle zum Schweißen. Die Temperatur des Lichtbogens besitzt eine weitaus höhere Temperatur als der zu schweißende Grundwerkstoff. Die hohe Temperatur im Lichtbogen führt zum Aufschmelzen der Fügestöße. Das darin entstehende Schmelzbad fließt durch eine pendelnde Vorschubbewegung zusammen. Außerhalb des Lichtbogens erstarrt das Schmelzbad zu einer Schweißnaht. Die Kontaktierung der Wolfram-Elektrode erfolgt durch ein Stromkontaktrrohr, welches sich innerhalb der Keramikschutzgasdüse befindet. Die Stromquelle kann im WIG-Schweißprozess neben dem Gleichstrom und gepulstem Gleichstrom auch mit Wechselstrom gespeist werden. Durch die Verwendung einer Wolfram-Elektrode, die unter der Prozesstemperatur nicht abschmilzt, ist der Einsatz von Zusatzwerkstoffen nicht zwingend notwendig. Sobald sich der Lichtbogen von grünlich in rötlich färbt, kann, falls erforderlich, der Zusatzwerkstoff seitlich zum Schmelzbad zugeführt werden.



**Abbildung 8 Funktionsprinzip des Wolfram-Inertgasschweißens [41]**

Das WIG-Schweißen wird meist für das Verbindungsschweißen von sicherheitsrelevanten und beaufsichtigungspflichtigen Bauteilen bzw. Baugruppen verwendet. Neben der hohen Nahtqualität überzeugt der WIG-Schweißprozess an Schweißnähten durch sein optisches Aussehen z.B. in Sichtfeldbereichen. Häufig wird dieses Verfahren im Sondermaschinenbau aufgrund seines praktisch universellen Verbindungsschweißens von metallischen Werkstoffen eingesetzt. [41]

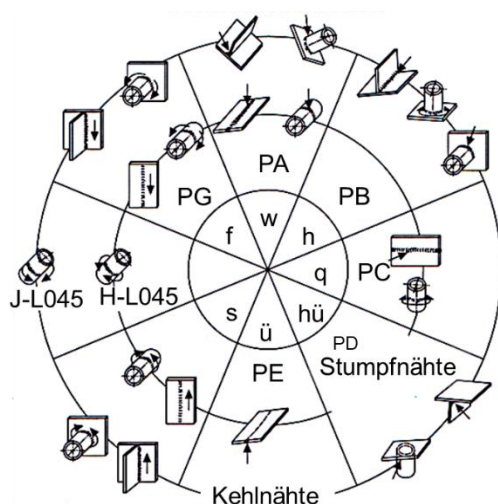
### **Schweißposition und Nahtarten**

Die Schweißposition beschreibt die Lage der Schweißnaht während des Schweißprozesses sowie die verwendete Schweißnahtart. [44]

Grundsätzlich unterscheiden sich die **Nahtarten** in Stumpfnähte (BW = butt weld) und in Kehlnähte (FW = fillet weld) [39]. Die Art der Schweißnaht beschreibt, wie die

Bauteile zu einer Baugruppe gefügt werden. Bei der Stumpfnahht befinden sich beide Bauteile Stoß an Stoß auf einer Ebene zueinander. An den Bauteilstößen wird eine V-förmige Öffnung eingeschliffen, damit eine Schweißverbindung über die gesamte Blechdicke der Naht sichergestellt werden kann. Als Kehlnähte werden die Schweißnähte bezeichnet, bei denen die Bauteile meist in einem rechten Winkel zueinander ausgerichtet sind. Die Schweißnaht besitzt dabei die Form eines Dreiecks. Je nach Art der Schweißverbindung unterscheiden sich die Kehlnähte. Die meist verwendeten Kehlnähte sind beispielsweise Flankennaht, Stirnnaht, Stegnaht, Halsnaht und Ecknaht. [45]

Nach der DIN EN ISO 6947 wird die Lage der Schweißnaht in acht Bereiche unterteilt, diese sind in der Abbildung 9 veranschaulicht und mit den Abkürzungen nach DIN beschrieben [44]. Die am häufigsten verwendeten Positionen sind das Schweißen in Wannenposition (PA), in Horizontalposition (PB), in Querposition (PC) und in Steigposition (PF). Jede verschiedene Schweißposition erfordert meist eine zusätzliche Qualifizierung der Facharbeiter, um die geforderte Nahtqualität sicherstellen zu können.



PA	Wannenposition	
PB	Horizontalposition	
PC	Querposition	
PD	Horizontalüberkopfposition	
PE	Überkopfposition	
PF	Steigposition	
PG	Fallposition	
H-L045	Steigposition*	* am 45° schräg eingespannten Rohr
J-L045	Fallposition*	
PH	steigend schweißen	
PJ	fallend schweißen	

**Abbildung 9    Schweißpositionen nach DIN EN ISO 6947 [44]**

Die Herausforderung besteht darin, die hohen Eigenschaften der Schweißverbindung in unterschiedlichen Positionen und Nahtarten zu erreichen. Einer der größten Einflussfaktoren ist die Gravitation. Je nach Position wird das Schweißbad positiv oder negativ beeinflusst. Daher ist beispielsweise das Schweißen in Steig- und Fallposition besonders anspruchsvoll und birgt eine große Gefahr für Korrosion und Porenbildung in der Schweißverbindung. Wohingegen beim waagerechten Schweißen von Stumpf- und Kehlnähten das Schmelzbad durch die Gravitation in Wannenlage steht, was für eine optimale Verbindung beider Bauteilstöße sorgt. Aus diesem Grund werden die Baugruppen meist in der Vorzugslage „Wannenposition (PA)“ geschweißt.



## **Schweißanweisung, Messen, Kontrollieren und Aufzeichnen von Schweißdaten**

Der Schweißprozess hat einen entscheidenden Einfluss auf die Produktionskosten. Um eine möglichst effiziente Schweißverbindung herzustellen, ist die Überwachung aller prozessrelevanten Parameter erforderlich. Daher ist es wichtig, die physikalischen Größen eines Schweißprozesses zu messen, zu kontrollieren und aufzuzeichnen. Anhand der erfassten Schweißparameter kann die Schweißverbindung eindeutig beschrieben werden und somit die Qualität des Erzeugnisses sichergestellt werden. Die Beschreibung einer Schweißverbindung ist aus einer Schweißanweisung zu entnehmen. Die **Schweißanweisung** (WPS = Welding Procedure Specification) legt die Planung von schweißtechnischen Tätigkeiten fest und gewährleistet die Überwachung der Fertigungsqualität während des Schweißvorgangs. Nach der Norm für die Schweißanweisung sind alle Angaben für eine qualitativ einwandfreie und reproduzierbare Schweißaufgabe und deren Durchführung aufgelistet. Dazu gehören unter anderem die Vorbereitung der Teile, die Schweißreihenfolge, gegebenenfalls das Vorwärmen der Teile, der Schweißprozess, die zulässigen Nacharbeiten der Schweißnaht und die geforderte Wärmebehandlung der jeweiligen Baugruppen. [46]

Resultierend aus der Norm des Qualitätssicherheitssystems [47] müssen alle sicherheitsrelevanten Schweißprozesse mit einer solchen schriftlichen Verfahrensbeschreibung beschrieben werden.

Das Messen von einzelnen Prozessgrößen erfolgt durch den Einsatz von mehreren unabhängigen Messgeräten, die während des Schweißprozesses die wichtigsten physikalischen Größen stichprobenartig ermitteln. Mit erfassten Messwerten kann der Bericht über die Qualifizierung des Schweißprozesses (WPQR = Welding Procedure Qualification Record) erstellt werden. In teil- und vollautomatisierten Montagesystemen wird die Qualität der Fügeverbindung meist über eine Schweißdatenüberwachungseinrichtung, zum Beispiel mit einem Qualitätssicherungssystem (QS-System), erfasst und dokumentiert. Dies ermöglicht eine lückenlose Messung der Prozessgrößen über einen zeitlichen Verlauf. Die Fertigungsqualität der Baugruppe wird direkt nach dem Schweißprozess durch das QS-System ermittelt. [48]

### **2.1.3 Industrieroboter**

Einen wesentlichen Bestandteil in den automatisierten Schweißprozessen bilden die Industrieroboter, die für schweißtechnische Zwecke eingesetzt werden. Nach dem Regelwerk DVS 0922, angelehnt an die Norm des VDI, sind „Industrieroboter zum Schweißen universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehr als drei Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind.“ [48 bis 50]

Häufig eingesetzt werden die Industrieroboter in der Montage zum Handhaben von Schweißbaugruppen sowie zum Punkt- und Bahnschweißen. Der größte Anteil an



Schweißrobotern liegt in der Automobilindustrie im Bereich des Karosseriebaus, jedoch wird in den letzten Jahren eine stetige Nachfrage der Schweißroboter in kleinen und mittelständischen Unternehmen festgestellt. Ein Grund dafür ist sicherlich, dass sich Industrieroboter besonders gut für die flexible Gestaltung der Automatisierung eignen. Die seit Jahrzehnten etablierten Bewegungseinrichtungen werden in der Regel als standardisiertes Grundgerät von unterschiedlichen Herstellern angeboten und sind zusätzlich mit einem anwendungsspezifischen Schweißwerkzeug auszustatten. Neben den unterschiedlichen Ausführungen und Leistungsklassen ist auf die Schweißtauglichkeit der Industrieroboter zu achten. Die Schweißtauglichkeit beinhaltet weitere zusätzliche Maßnahmen hinsichtlich der Abschirmung und Erdung aller Roboterkomponenten.

Der Industrieroboter lässt sich nach der Richtlinie VDI 2861 in die Komponenten der mechanischen Struktur und Steuerung unterteilen (vgl. Abbildung 10). Die mechanische Struktur besitzt einzelne Glieder, die die Gelenke und Endeffektoren eines Roboters untereinander verbinden. Die Gelenke bestehen aus den Antrieben und den jeweiligen Übersetzungsgetrieben. Die Übersetzungsgetriebe übersetzen bzw. übersetzen das Drehmoment eines Antriebs und übertragen das Moment auf die jeweilige Achse. Der Endeffektor ist die Schnittstelle zwischen Roboter und Prozess. Die Regelung der Energieversorgung der Antriebe, der Logikteil sowie die Messsysteme und Sensoren zur Überwachung der Parameter und der Sicherheit werden durch die Steuerung des Roboters bereitgestellt.

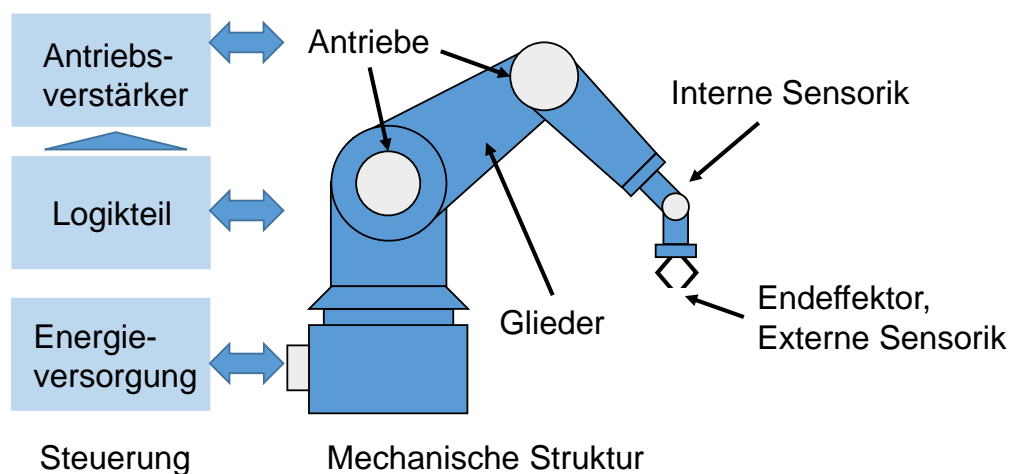
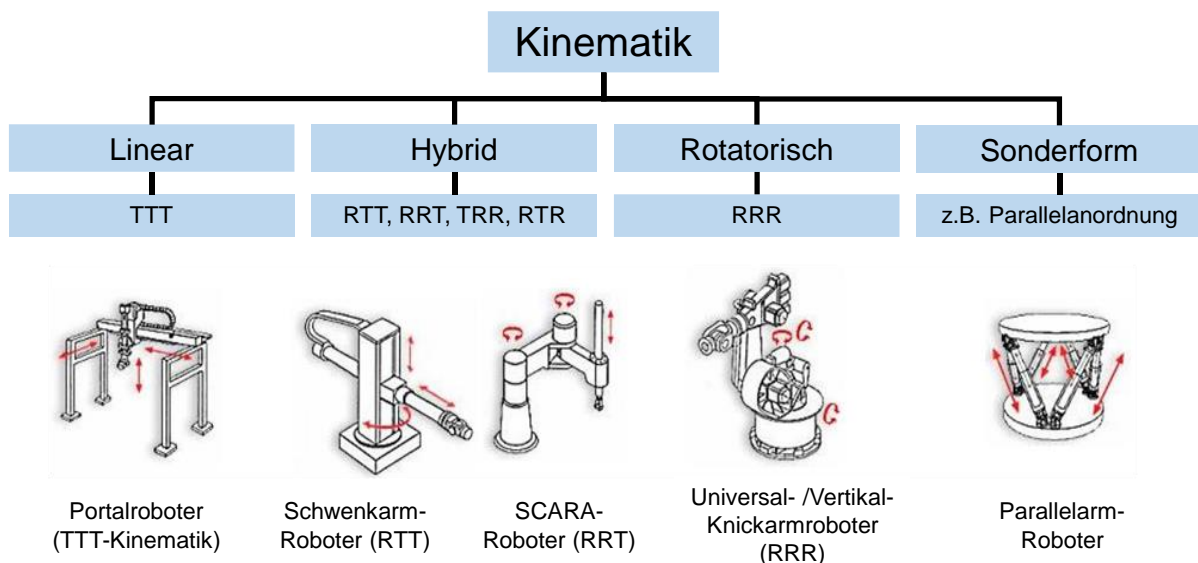


Abbildung 10 Komponenten eines Industrieroboters

Industrieroboter werden in unterschiedliche **kinematische Strukturen** unterteilt. Gemäß der Definition ist die Mechanik eines Roboters durch mindestens drei frei programmierbare Achsen gekennzeichnet. Bei einem klassischen seriellen Industrieroboter (z.B. Knickarm-Roboter) wird die kinematische Struktur in Haupt- und Nebenachsen aufgeteilt [50]. Die ersten drei Achsen, sogenannte Hauptachsen, werden als regionale Struktur des Roboters bezeichnet. Die regionale Struktur ist in

erster Linie für die räumliche Position maßgebend, welche in den drei Dimensionen (Länge, Breite und Höhe) gekennzeichnet ist. Wohingegen jede weitere Achse als Nebenachse und damit als lokale Struktur zur Orientierung des Werkzeugs bzw. Körpers fungiert. Die Achsen werden je nach kinematischer Struktur als translatorische und/oder rotatorische Bewegungen ausgelegt. Die Abbildung 11 zeigt die Kombination von verschiedenen Gelenktypen (T für translatorisch und R für rotatorisch) für die regionale Struktur. Je nach Kombination werden Robotertypen mit unterschiedlichen Arbeitsräumen abgebildet. [21, 51]



**Abbildung 11 Unterschiedliche kinematische Strukturen eines Industrieroboters [21, 52]**

Die lokale Struktur des Roboters wird auch als Roboterhandgelenk bezeichnet. Dabei unterscheidet sich die lokale Struktur in ihrer Bauweise in zwei gängige Handgelenke. In der Zentralhand bzw. Eulerhand schneiden sich alle drei Nebenachsen in einem Punkt. Die mit einem sehr hohen Fertigungssaufwand verbundene Zentralhand bringt gewisse Vorteile in der mathematischen Beschreibungsform für die spätere Rückwärtstransformation der gesamten kinematischen Struktur.

Eine weitere Bauform der lokalen Struktur ist die Winkelhand, welche durch die Verbreitung von Robotern mit integriertem Servoverstärker und Motor-Getriebe-Kombination an Bedeutung gewinnt. Die möglichst kompakte Anordnung der Antriebseinheiten führt zu einem Aufbau der Nebenachsen, bei dem sich die Handachsen nicht in einem Punkt schneiden (vgl. Abbildung 12 b).

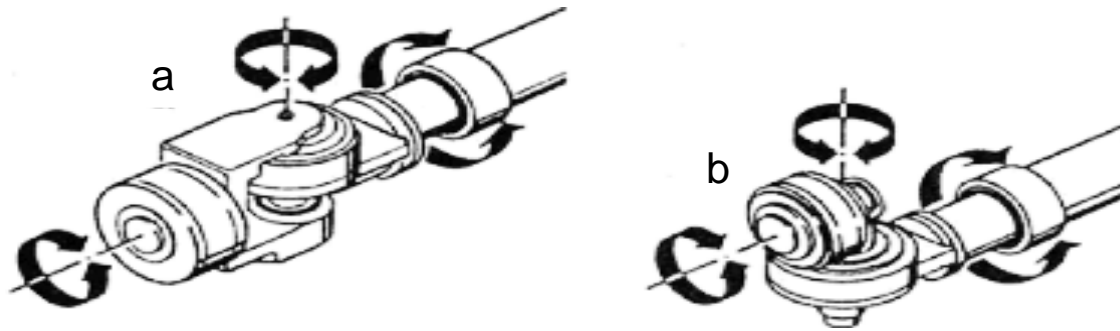


Abbildung 12 Gängige lokale Strukturen eines Industrieroboters [53]

In der vorliegenden Arbeit wird eine serielle Struktur mit rotatorischen Haupt- und Nebenachsen eingesetzt, wie in Abbildung 11 veranschaulicht. Die gewählte Knickarmroboterstruktur erfüllt die Anforderungen in Bezug auf Steifigkeit und Arbeitsraum ausreichend. Die Betrachtung der Dynamik ist in dieser vorliegenden Arbeit nicht erforderlich, da die Dynamik keinen großen Einflussfaktor darstellt.

Die **Steuerung** verleiht dem Industrieroboter die „maschinelle Intelligenz“ und trägt maßgeblich zu den Eigenschaften des Systems bei. Die Robotersteuerung kann auf die wesentlichen Komponenten des Rechnerteils, des Leistungsteils und der Peripherie reduziert werden, welche in Abbildung 13 veranschaulicht sind.

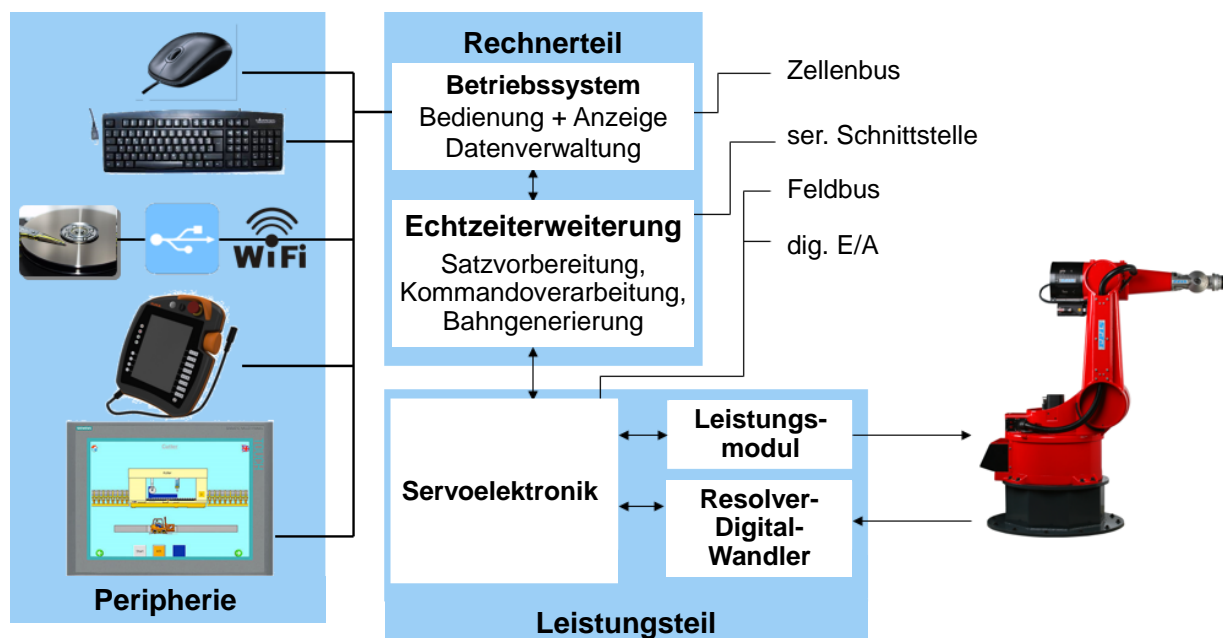


Abbildung 13 Komponenten einer Robotersteuerung [52]

Die Steuerungsperipherie beschreibt die Benutzerschnittstellen und die Archivierungseinheiten. Neben dem Einsatz von Massenspeichern für die Speicherung von Prozessdaten und Programmen ist das Programmierhandgerät oder ein Bedientableau eine der wichtigsten Peripheriekomponenten eines

Industrieroboters. Der Rechnerteil besteht meistens aus einem Industrierechner mit Betriebssystem, der die Visualisierung, die Bedienung und die Datenverwaltung bereitstellt. Mittels der Echtzeiterweiterung erfolgen die Satzvorbereitung, die Kommandoverarbeitung und die Generierung der Roboterbahn. Der Leistungsteil der Steuerung beinhaltet die Regelung und Fehlerüberwachung der einzelnen Antriebe innerhalb der Servoelektronik. Die Energieversorgung der Antriebe stellt das Leistungsmodul sicher und das Abgleichen der gemessenen Achswinkel mit den Eingangssignalen im Regelkreis übernimmt der Resolver-Digital-Wandler.

Die **Programmierung eines Industrieroboters** kann mit verschiedenen Programmierverfahren erfolgen. Für die Programmierung einer Roboterbewegung wird generell in Anlehnung an Weber und Roos [54, 55] zwischen der Offline- und Online-Programmierung unterschieden. Die Online-Programmierung ermöglicht das Erstellen einer Roboteranwendung auf dem betrieblichen Hallenboden, sprich direkt am Einsatzort des Roboters.

Zu den klassischen **Online-Programmierungen** gehört das Teach-In- und Playback-Verfahren. Die Funktion Teach-In-Programmierung oder direkte Programmierung ermöglicht das Anfahren und Abspeichern von markanten Stützpunkten in der Roboterbahn. Mit einem Eingabegerät, wobei meistens das Bediengerät des Roboterherstellers verwendet wird, werden die geforderten Posen angefahren und im Anschluss durch Eingabe weiterer Parameter (z.B. Art der Interpolation, Werkzeugfunktionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) vervollständigt. Eine weitere Funktion der Online-Programmierung ist das geführte Abfahren und Aufzeichnen von Roboterbahnen. Dies wird in der Literatur als Playback-Verfahren bezeichnet [51].

Die Vorteile des Online-Programmiervorgangs sind unter anderem die geringen Programmierkenntnisse, die für das Einstellen des Roboters nötig sind und die Vorgabe der Bewegung am realen Objekt unmittelbar am Einsatzort des Roboters. Ein wesentlicher Nachteil dieser Programmierung ist die Stillstandzeit des Roboters in der Produktion. Auch die Einbindung weiterer Sensorik oder die Ansteuerung von externen Aktoren ist ohne weitere Softwareprogramme nicht möglich [56]. Komplexe Roboterbewegungen können nur bis zu einem gewissen Schwierigkeitsgrad erstellt werden, da sonst der hohe Aufwand für die Programmierung der Applikation nicht vertretbar ist.

Im Vergleich zu der Online-Programmierung erfolgt bei der **Offline-Programmierung** i.d.R. keine vollständige Programmerstellung auf der Robotersteuerung. Trotzdem ist die Offline-Programmierung weitestgehend von der Robotersteuerung losgelöst. Das Roboterprogramm wird meist simulationsbasiert auf einem separaten Applikationsrechner erstellt. Neben den simulationsbasierten Programmierverfahren gibt es weitere Verfahren, wie beispielsweise das textbasierte Erstellen einer Roboteranwendung durch die Verwendung einer Hochsprache sowie die Programmablaufplanung und die aufgabenorientierte Programmierung einer

Roboterbewegung. Eine reine Offline-Programmierung kommt in den seltensten Anwendungen in der Praxis zum Einsatz; denn die Offline-Programmierung berücksichtigt keine „Vorgänge in der Arbeitszelle des Roboters, Toleranzen von Werkzeugen und Werkstücken und Längentoleranzen am Roboterarm“ [54]. Die Abweichung zwischen der programmierten und realen Roboterbewegung erfordert erfahrungsgemäß die Anpassung der Bewegung durch eine Online-Programmierung. Die Kombination der Vorteile aus Online- und Offline-Verfahren wird als **hybride Programmierung** gekennzeichnet (vgl. Abbildung 14). Das im Vorfeld generierte Roboterprogramm auf dem Anwendungsrechner wird am Einsatzort an die Umgebung der Roboterzelle angepasst. [52, 57]

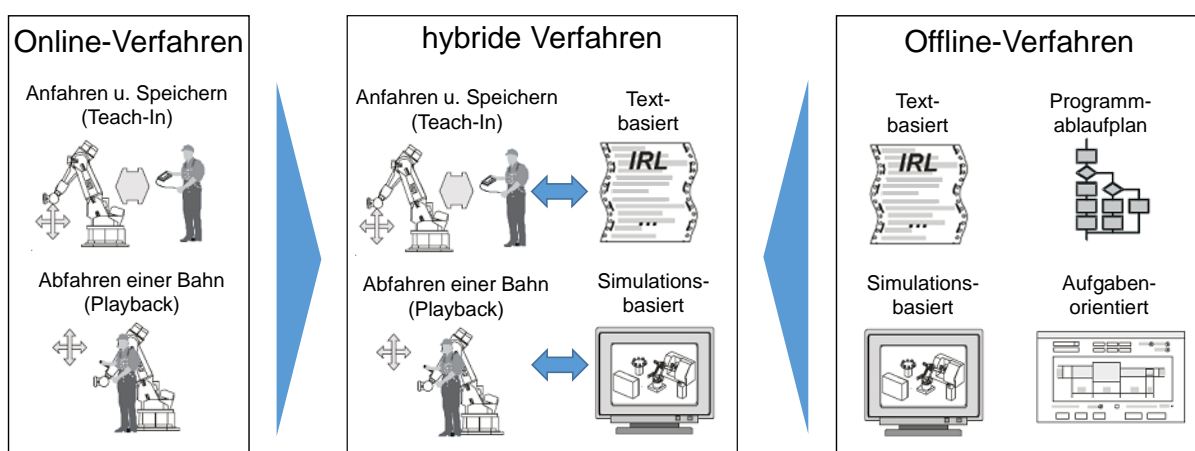


Abbildung 14 Programmierverfahren eines Industrieroboters [57]

Die Bewegung des Roboters erfolgt durch die **Planung** der Bahn in einem dreidimensionalen Raum. Aus den Randbedingungen der Geschwindigkeit und Beschleunigung kann i.d.R. der zeitliche Ablauf der Bewegung des Roboters modelliert werden. Bei der Planung der Roboterbahn wird zudem der Arbeitsraum des Roboters beachtet, welcher durch den Bewegungsbereich des Roboters begrenzt ist.

Die Art der Bewegungen eines Industrieroboters wird in drei unterschiedliche Steuerungsprinzipien unterteilt. Die einfachste Form der Bewegungsart ist die **Punktsteuerung**, auch bekannt unter der Abkürzung PTP, was für eine Punkt-zu-Punkt-Interpolation steht. Diese Art von Bewegung wird häufig für das Handhaben von Baugruppen im freien Raum verwendet. Dabei wird jede einzelne Achse zwischen Start- und Zielposition frei interpoliert. Die Ansteuerung der Bewegungsart kann asynchron, synchron und vollsynchron erfolgen.

Das **asynchrone PTP**-Anfahren der Zielposition bedeutet, dass jede Achse des Roboters zeitgleich mit der vorgegebenen Geschwindigkeit die Zielposition anfährt. Dabei erreicht jede Achse in unterschiedlichen Zeiten die Zielposition, so dass die Achse mit der längsten Laufzeit die Dauer der Bewegung festlegt. Beim **synchronen PTP**-Verfahren sind die Laufzeiten aller Achsen identisch, dafür wird durch die

Steuerung die Leitachse bestimmt. Die Leitachse beschreibt diejenige Achse, die die längste Laufzeit in einem Bewegungselement besitzt. Bezogen auf die Dauer der Bewegung werden die Geschwindigkeiten aller anderen Achsen reduziert. Wohingegen das **vollsynchrone PTP**-Verfahren neben den gleichen Bahnzeiten noch die gleichen Beschleunigungs- und Bremszeiten an jedem Gelenk berücksichtigt. [51]

Eine weitere Bewegungsart ist die **Vielpunktsteuerung** (MP = multi point). Bei dieser Steuerung wird eine geometrisch komplexe Bahn durch das Abtasten bzw. Speichern von Punkten beschrieben. Je nach Anwendung kann die Vielpunktsteuerung für die Programmierung von Roboterbahnen durch das Online-Programmierverfahren Playback genutzt werden. Das Abfahren zwischen dem definierten Raster erfolgt durch die PTP-Fahrt.

Für die exakte geometrische Beschreibung der Bewegung eines Roboters wird die Bewegungsart **Bahnsteuerung** (CP = continuous path) verwendet. Die Pose des Endeffektors ist während der gesamten Bahn festgelegt. In der Bahnsteuerung stehen verschiedene Geometrien zur mathematischen Beschreibung der Bahnsegmente zur Verfügung, dazu gehören unter anderem die Linear-, Zirkular- oder Spline-Interpolation (vgl. Abbildung 15). Mit diesen Geometrien kann beispielsweise die Programmierung von Fügevorgängen vereinfacht werden. So kann eine geradlinige Bewegung des Roboters zwischen Start und Endpunkt über eine **Linear-Interpolation** ausgeführt werden. Für die Bewegung einer kreisförmigen Bahn kann die **Zirkular-Interpolation** verwendet werden. Jedoch ist zwischen dem Start- und Endpunkt ein weiterer Stützpunkt für das Beschreiben der Kreisebenen im Raum notwendig. Die **Spline-Interpolation** wird beim Abfahren von gekrümmten Bahnen gewählt. Hierbei wird der Endeffektor in einer definierten Orientierung anhand der Stützpunkte entlang der gebogenen Bahn geführt.

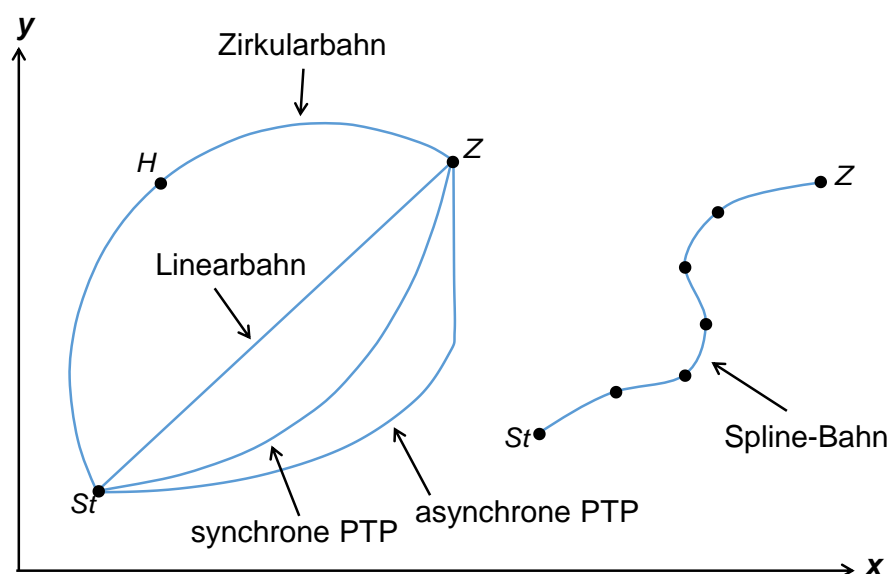


Abbildung 15 Verschiedene Bewegungsarten eines Roboters [51]



Die vorliegende Arbeit befasst sich überwiegend mit dem Schweißen von geraden Bahnsegmenten. Zu diesem Zweck wird die Linear-Interpolation verwendet. Die Linear-Interpolation beschreibt die kürzeste Verbindung zweier Bahnstützpunkte im Raum unter der Betrachtung von Position und Orientierung. Dabei wird der Endeffektor des Roboters von einer Startpose in die Endpose entlang einer Geraden geführt.

Die Abbildung 16 zeigt eine Schweißnaht an einer Baugruppe, die durch die Startpose  $\underline{w}_i$  und der Endpose  $\underline{w}_{i+1}$  beschrieben wird.

$$\underline{w}_i = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) \quad (2.1)$$

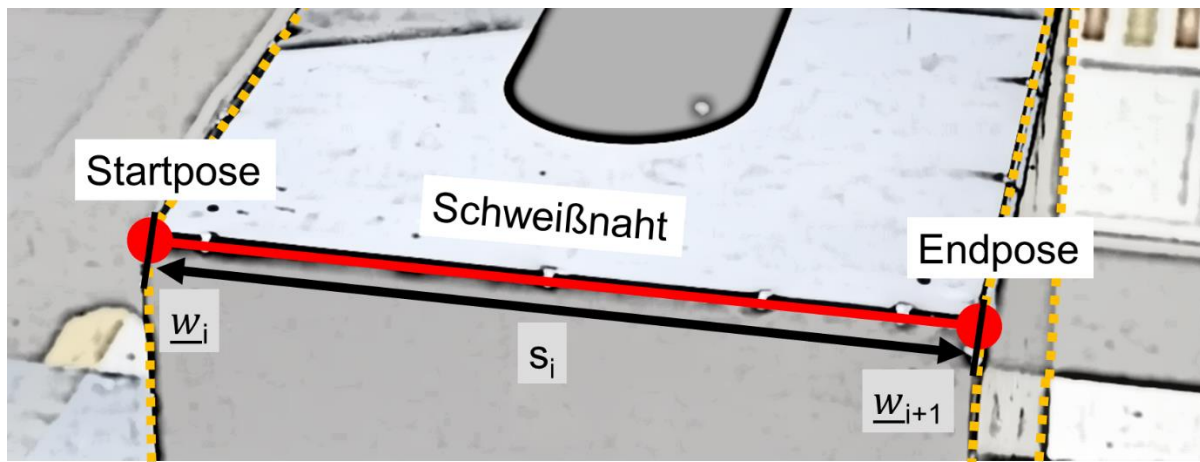


Abbildung 16 Linear-Interpolation einer Schweißnaht

Der Endeffektor soll mit dem Bahnparameter  $s_i$  entlang des geraden Bahnelements zwischen der Anfangslage  $\underline{w}_i$  in die Endlage  $\underline{w}_{i+1}$  geführt werden. Durch das Aufstellen der Geradengleichung  $\underline{w}(s)$  wird der geometrische Abstand der beiden Stützpunkte mit der Länge  $s_i$  beschrieben, siehe Formel 2.2. Dabei wird der Bahnparameter  $s$  schrittweise erhöht, um anschließend die Bahn von 0 bis  $s_i$  zu durchfahren. Dabei erfolgt eine Trennung von Geometrie und Zeit, welche die Bewegungsgeometrie unabhängig von der Bahngeschwindigkeit macht.

$$\underline{w}(s) = \underline{w}_i + \frac{s}{s_i} (\underline{w}_{i+1} - \underline{w}_i) \quad 0 \leq s \leq s_i \quad (2.2)$$

Die Schweißnaht als Gerade besitzt eine konstante Steigung  $\underline{w}'(s)$  und ist entlang des Bahnelements unabhängig vom Bahnparameter  $s$ . Die Steigung wird über die Formel 2.3 berechnet.

$$\underline{w}'(s) = \frac{1}{s_i} (\underline{w}_{i+1} - \underline{w}_i) \quad (2.3)$$

Abschließend wird noch die Krümmung der Schweißnaht bestimmt, welche sich aus der zweiten Ableitung der Geradengleichung ergibt. Die Krümmung entlang der linearen Schweißbahn ist konstant Null. (vgl. Formel 2.4)

$$\underline{w}''(s) = 0 \quad (2.4)$$

Neben der Linear-Interpolation gibt es noch weitere Arten der Interpolation zwischen den Bahnstützpunkten, wie beispielsweise die Kreis-Interpolation oder die Spline-Interpolation.

### Beschreibungsmöglichkeiten

Ein Objekt in einem Raum wird in Bezug auf zwei Koordinatensysteme beschrieben. Dabei erfolgt die Beschreibung i. d. R. in einem objekteigenen Koordinatensystem zu einem Bezugskoordinatensystem und ergibt sich aus sechs Freiheitsgraden. Die Freiheitsgraden unterteilen sich in drei Rotationsparameter  $\alpha, \beta, \gamma$  und in drei Translationsparameter  $x, y, z$ . [46, 48]

Die Position eines Punktes oder eines Koordinatensystems bezogen auf ein Koordinatensystem in einer Ebene bzw. im Raum wird durch einen Ortsvektor beschrieben, dargestellt in Abbildung 17.

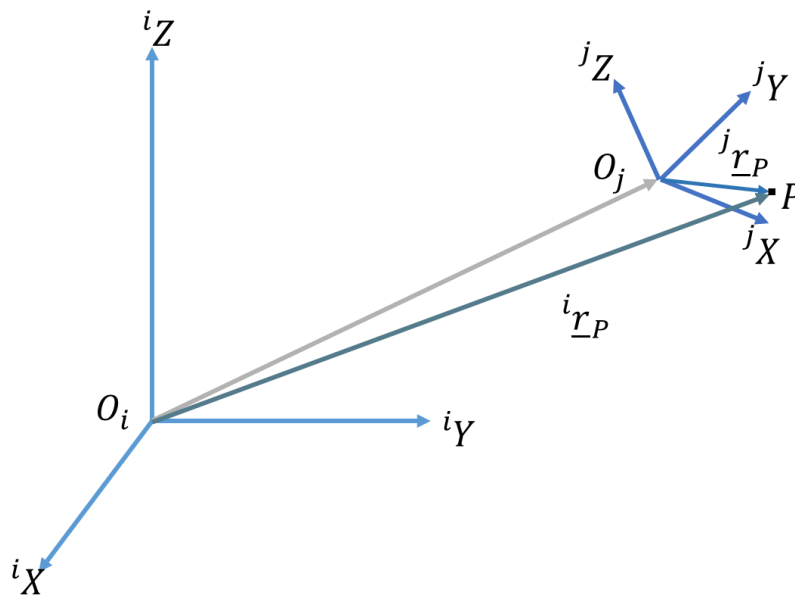


Abbildung 17 Beschreibung eines Punktes durch Vektoren

Der Ortsvektor  ${}^i\underline{r}_P$  sowie der Ortsvektor  ${}^j\underline{r}_P$  beschreiben den Punkt  $P$  aus dem jeweiligen kartesischen Koordinatensystem  $(O_i; O_j)$  eindeutig. Allgemein beginnt der Ortsvektor im Ursprung eines Bezugskoordinatensystems und endet im Ursprung des objekteigenen Koordinatensystems. Dabei wird der Ortsvektor, auch bekannt unter dem Begriff **Positionsvektor**, durch die kartesischen Koordinaten in  $x, y$  und  $z$  gebildet und ist somit durch seinen Betrag (Länge) und seine Richtung definiert. [51]

$${}^i\underline{r}_P = \begin{pmatrix} {}^ix_P & {}^iy_P & {}^iz_P \end{pmatrix}^T \quad (2.5)$$



Lediglich die Position eines Koordinatensystems reicht aber für eine vollständige Beschreibung eines Koordinatensystems nicht aus. Neben der Position ist auch noch die Darstellung der Orientierung eines Körpers bzw. Werkzeugs im Raum erforderlich. In der Literatur wird die Beschreibung der Position und Orientierung als die Pose des Roboters bezeichnet. [51, 54]

Für die Beschreibung der Orientierung zweier kartesischer Koordinatensysteme mit dem gleichen Ursprung ist die Rotation um drei unterschiedliche Achsen erforderlich. Die Reihenfolge und die Kombination der Matrizenmultiplikationen der Orientierung werden durch eine Rotationsnotation gekennzeichnet. In der Anwendung gibt es mehrere verschiedene Notationen. Zu den etablierten Notationen in der Industrierobotik gehören die Roll-, Pitch-, Yaw-Notation, die sequentielle Notation und die Euler-Notation. Vermehrt wird die Orientierung durch eine Winkelbeziehung zwischen Werkzeug und Bezugskoordinatensystem gebildet und wird als Quaternion bezeichnet. Die Quaternionen werden aus den einzelnen Elementen der drei Achsvektoren gebildet. Roboterintern wird meist in Quaternionen gerechnet, was oft in der Programmierung und in der Planung von Bewegungen vorteilhaft ist.[58]

In der vorliegenden Arbeit wird für die Beschreibung der Orientierung die RPY-Notation verwendet. Die Abkürzung RPY-Notation ist an die Luftfahrt angelehnt und steht für Roll (Drehachse), Pitch (Nickachse, Neigen) und Yaw (Gierachse) (vgl. Abbildung 18).

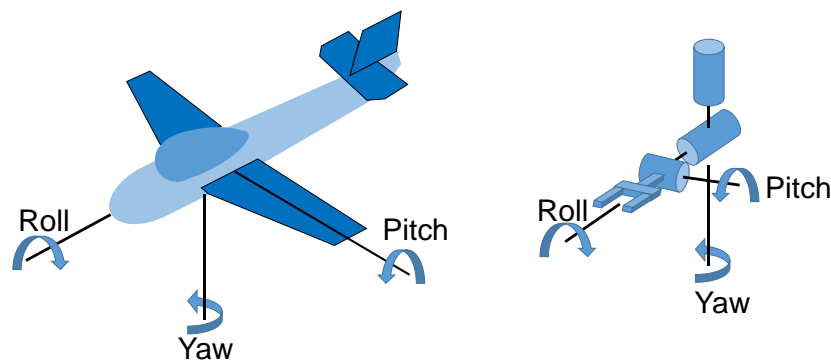


Abbildung 18 RPY-Notation eines körperfesten Koordinatensystems [58]

Die Notation der RPY sieht eine Drehung mit den Winkeln  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  an den jeweiligen Achsen  $x$ ,  $y$  und  $z$  eines mitdrehenden Hilfskoordinatensystems vor. Die Reihenfolge einer RPY-Notation sieht zuerst die Rotation um die Z-Achse unter dem Winkel  $\alpha$  vor, im Anschluss als Rotation um die Y-Achse des entstehenden Hilfskoordinatensystems unter dem Winkel  $\beta$  und abschließend mit der Rotation um die X-Achse des aktuellen Hilfskoordinatensystems unter dem Winkel  $\gamma$  definiert. Diese Reihenfolge muss eingehalten werden. [58]

$$\mathbf{R}_{RPY}(\alpha, \beta, \gamma) = \mathbf{Rot}(z, \alpha) \times \mathbf{Rot}(y, \beta)' \times \mathbf{Rot}(x, \gamma)'' \quad (2.6)$$

Die Beschreibung der Orientierung eines Koordinatensystems bezogen auf ein anderes Koordinatensystem erfolgt durch eine **Drehmatrix**. Die Matrix überführt die Drehung der jeweiligen Achsen in einem beliebigen Koordinatensystem  $O_j$  um das feststehende Bezugskoordinatensystem  $O_i$ . [59]

$${}^i\mathbf{B}_j = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{21} & b_{31} \\ b_{12} & b_{22} & b_{32} \\ b_{13} & b_{23} & b_{33} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Für das einfache Beschreiben von der Position und Orientierung im Raum wird eine 4x4 Transformationsmatrix eingeführt. Die sogenannte **homogene Matrix** vereint die Matrizenmultiplikation der Drehmatrix mit der Vektoraddition der Positionsvektoren. Dabei wird die 4x4 Matrix aus der Drehmatrix und dem Positionsvektor gebildet, worin die letzte Zeile der Matrix mit unveränderlichen Zahlen (0,0,0,1) erweitert wird. Die Erweiterung der Matrix ermöglicht eine einfache Verrechnung der homogenen Matrizen miteinander.

$${}^i\mathbf{A}_j = \begin{pmatrix} {}^i\mathbf{B}_j & {}^i\mathbf{r}_{O_j, O_i} \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

### Koordinatensysteme in der Robotik

Für die räumliche Beschreibung der Pose eines Roboters stehen verschiedene Koordinatensysteme zur Verfügung. Generell unterscheidet man die Koordinatensysteme (Abbildung 19) in Welt-, Basis-, Endeffektor- und Bezugskoordinatensysteme. Die Bezugskoordinatensysteme sind unter anderem Werkzeug-, Werkstück- sowie weitere Hilfskoordinatensysteme und variieren je nach Roboterhersteller.

Das Welt-Koordinatensystem ist das Hauptkoordinatensystem, auf das sich alle anderen Koordinatensysteme im Raum beziehen. Der Ursprung und die Orientierung des Welt-Koordinatensystems sind frei wählbar und liegen fest im Raum, in der Regel an einer gut zugänglichen Lage. Jeder Roboter besitzt ein Basis-Koordinatensystem, wobei der Ursprung im Roboterfuß liegt, meistens im Mittelpunkt der Standfläche. Am Endpunkt der kinematischen Kette eines Roboters befindet sich das Endeffektor-Koordinatensystem. Bezogen auf das Basis-Koordinatensystem bildet das Endeffektor-Koordinatensystem die Pose des Roboters ab. Durch die Veränderung der Achswinkel wird die Pose am Endeffektor, am Flansch des Roboters, beeinflusst. Als Bezugskoordinatensystem kann auch das Werkzeug-Koordinatensystem (TCP = Tool Center Point) gewählt werden. Hierbei wird der am Werkzeug befindliche Arbeitspunkt als TCP bezeichnet.

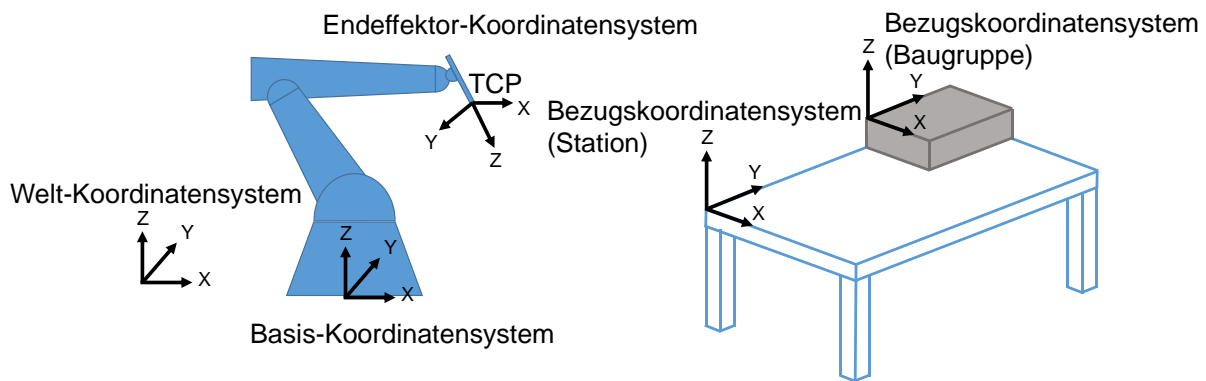


Abbildung 19 Darstellung der verschiedenen Koordinatensysteme

Für ein flexibles Robotersystem ist die Einführung von weiteren Bezugskoordinatensystemen erforderlich. Die zusätzlichen Bezugskoordinatensysteme stellen eine feste bzw. temporäre mathematische Beziehung zu einer Baugruppe oder einer Station dar. Demnach können die Roboteranwendungen von der Station relativ zur Baugruppe und nicht absolut zum Welt-Koordinatensystem programmiert werden. So kann beispielsweise die Baugruppe oder die Station verschoben werden und anschließend durch eine Vermessung der Bezugskordinaten zum Welt-Koordinatensystem schnell wieder in Betrieb genommen werden. Aber auch die Modifikation der Roboteranwendung wird durch die Verwendung von Bezugskoordinatensystemen erleichtert.

Die mathematische Berechnung der kinematischen Kette vom Basis-Koordinatensystem ins Endeffektor-Koordinatensystem wird als Koordinatentransformation bezeichnet (siehe Abbildung 20). Die Transformation ermöglicht die Berechnung von kartesischen Koordinaten in Gelenkvariablen, die sogenannte **Rückwärtstransformation** oder aber auch die Berechnung von Gelenkstellungen in die kartesischen Koordinaten, die sogenannte **Vorwärtstransformation**. Mit der Kenntnis der Gelenkvariablen, welche in Abbildung 20 als Drehwinkel  $\delta$  vorliegen, kann die Position und Orientierung des Endeffektors bestimmt werden. Mittels der Vorwärtstransformation wird für jedes Gelenk der kinematischen Hauptkette die homogene Matrix ermittelt und die Gesamttransformation durch die Multiplikation der einzelnen Matrizen gebildet. Bei der Rückwärtstransformation werden dem Roboter aus einer Anwendung bestimmte kartesische Punkte bzw. Bahnplanungen vorgegeben. Für das Ausführen der Bahn sind die Gelenkwinkel der Posen des Roboters zu ermitteln. [51]

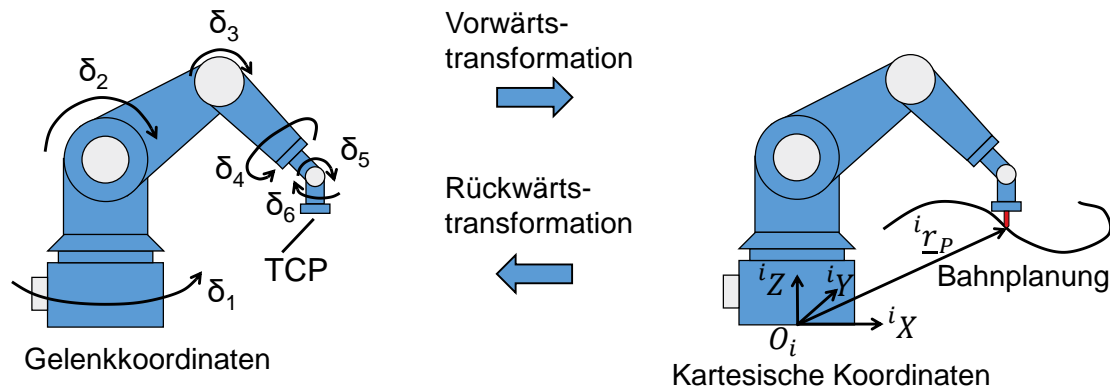


Abbildung 20 Verfahren der Vorwärts- und Rückwärtstransformation [58]

Der vermehrte **Einsatz von Sensoren** in der Robotertechnologie wird einerseits für die Prozesssicherheit, aber auch zunehmend als Schutz Einrichtung in überlappenden Arbeitsräumen zwischen Mensch und Roboter verwendet. Für das Absichern von Arbeitsräumen bzw. das Detektieren von Kollisionskräften ist das Einbinden einer gelben Sensorik in einem Sicherheitskreis erforderlich, welche die Anforderungen der Sicherheit von Maschinen mit den betroffenen Normen EN ISO 12100, EN 60204-1 und EN ISO 13849 erfüllt [60 bis 62]. Die im Robotersystem verwendete gelbe Sensorik kann nicht nur als Schutz Einrichtung, sondern auch zum Absichern der Produktionsprozesse verwendet werden. Wohingegen die grauen Sensoren ausschließlich für das Überwachen von Prozessparametern genutzt werden dürfen.

Um die Flexibilität der Roboterschweißsysteme zu erhöhen, werden Sensorsysteme eingesetzt und in die Sensorprinzipien unterteilt. Dabei machen gegebenenfalls die Abweichungen der Toleranzen am Produkt, im Prozess und der eingesetzten Betriebsmittel einen Sensoreinsatz erforderlich. Die Sensoren beim Lichtbogenschweißen erfassen einerseits die Abweichungen der Lage oder Geometrie und andererseits die prozessorientierten Anforderungen eines Schweißprozesses, wie beispielsweise Lichtbogen oder optisches Erfassen des Schmelzbades [63]. Die Abbildung 21 zeigt weitere Unterteilungen.

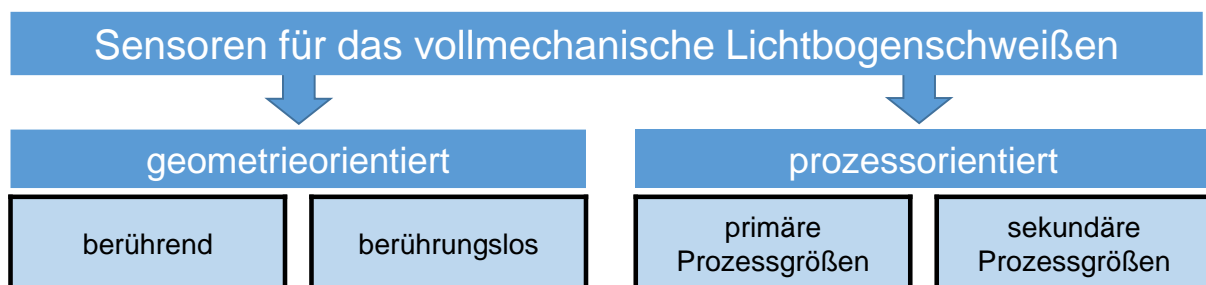


Abbildung 21 Übersicht einsetzbarer Sensorprinzipien für das vollmechanische Lichtbogenschweißen [63]

So wird neben der geometrieorientierten Sensorik, die in berührend und berührungslos unterteilt ist, noch die prozessorientierte Sensorik abgegrenzt und in primäre und sekundäre Prozessgrößen gegliedert. Zu jeder Unterteilung werden die möglichen Wirkprinzipien erläutert. [39]

## 2.2 Mensch-Roboter-Kooperation

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen und die Definition der Mensch-Roboter-Kooperation erläutert. Anschließend werden der Stand der Technik und zentrale Schlüsselkomponenten einer MRK beschrieben. Abschließend erfolgt eine Bewertung, der am Markt erhältlichen Technologieansätze in einer MRK.

### 2.2.1 Spektrum der Mensch-Roboter-Kooperation

Zur Beschreibung der Zusammenarbeit zwischen Mensch und einem Robotersystem werden in der Literatur mehrere Begrifflichkeiten verwendet. Im Folgenden werden die Begrifflichkeiten festgelegt, welche innerhalb dieser Arbeit genutzt werden.

Die Mensch-Roboter-Kooperation beschreibt die Interaktion zwischen Mensch und Roboter. Dies beinhaltet das gerichtete Wirken und Handeln zwischen einem oder mehreren Menschen und einem oder mehreren Robotersystemen. [2, 8]

Bei der Gestaltung der Arbeitsräume in einer Mensch-Roboter-Kooperation wird die Definition des Fraunhofer – Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation zugrunde gelegt. In einer Veröffentlichung von Wilhelm Bauer zum Thema „Leichtbauroboter in der manuellen Montage – Einfach Einfach Anfahren“ [64] werden die Spektren einer Mensch-Roboter-Kooperation erläutert. Als Grundlage dient das Zusammenführen der Tätigkeiten an einem Arbeitsplatz, bei dem eine strikte Trennung zwischen manuellen und automatisierten Arbeitsräumen aufgehoben wird. Die Arbeitsräume zwischen Mensch und Roboter überlappen und bilden einen gemeinsamen Arbeitsraum. In Abbildung 22 sind die jeweiligen Arbeitsräume farblich gekennzeichnet. [64]

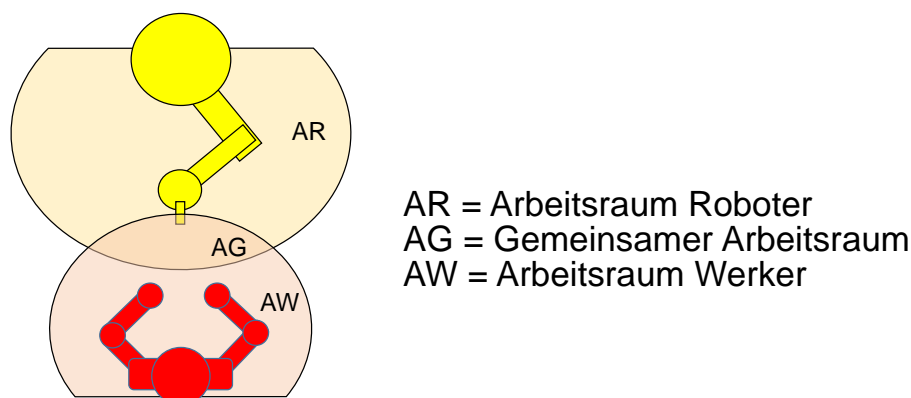


Abbildung 22 Arbeitsräume von Mensch und Roboter [64]

Das **Spektrum einer MRK** wird in verschiedenen Graden der Zusammenarbeit beschrieben. Die Abbildung 23 definiert den Grad der Zusammenarbeit zwischen

Mensch und Roboter. Einleitend ist auf der linken Seite der Abbildung die Arbeitsform „konventionell“ zwischen Mensch und Roboter dargestellt. Durch eine strikte Trennung der Arbeitsräume mit einer trennenden Schutz Einrichtung, z.B. mittels Schutzzaun, ist ein gemeinsamer Arbeitsraum nicht möglich [64]. Man spricht in der Literatur auch von einer zeitlichen und räumlichen Trennung [8, 64]. Die konventionelle Arbeitsform wird nicht als MRK beschrieben, während die „Autark [8] / Koexistenz“ [64] eine Form der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter beschreibt. Diese Form der Zusammenarbeit wird in dieser Arbeit als Koexistenz festgelegt. Zwar liegt in dieser Arbeitsform kein gemeinsamer Arbeitsraum vor, jedoch kann ein Wirken und Handeln, basierend auf einem barrierefreien Arbeitsraum, durch die Verwendung von nicht trennenden Schutz einrichtungen, z.B. einer Lichtschranke, erfolgen. In der Arbeitsform „synchronisiert“ befindet sich im gemeinsamen Arbeitsraum immer nur ein Aktionspartner. Der Arbeitsraum wird über entsprechende Schutz einrichtungen überwacht. Die „Kooperation“ beschreibt das Agieren im gemeinsamen Arbeitsraum zur gleichen Zeit mit unterschiedlichen Arbeitsinhalten. Die höchste Arbeitsform der Mensch-Roboter-Kooperation ist die „Kollaboration“. Diese Form der Zusammenarbeit beschreibt das Ausführen einer gemeinsamen Arbeitsoperation zur gleichen Arbeitszeit [64]. In der Kollaboration wird der Prozess durch den Menschen und den Roboter beeinflusst.

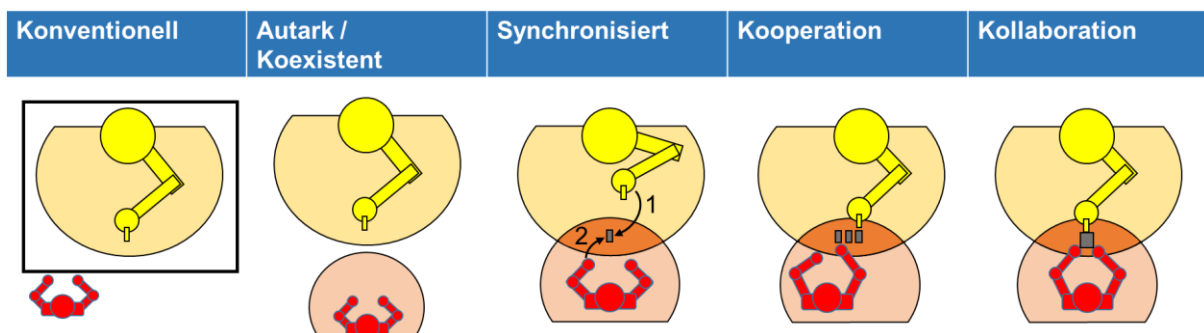
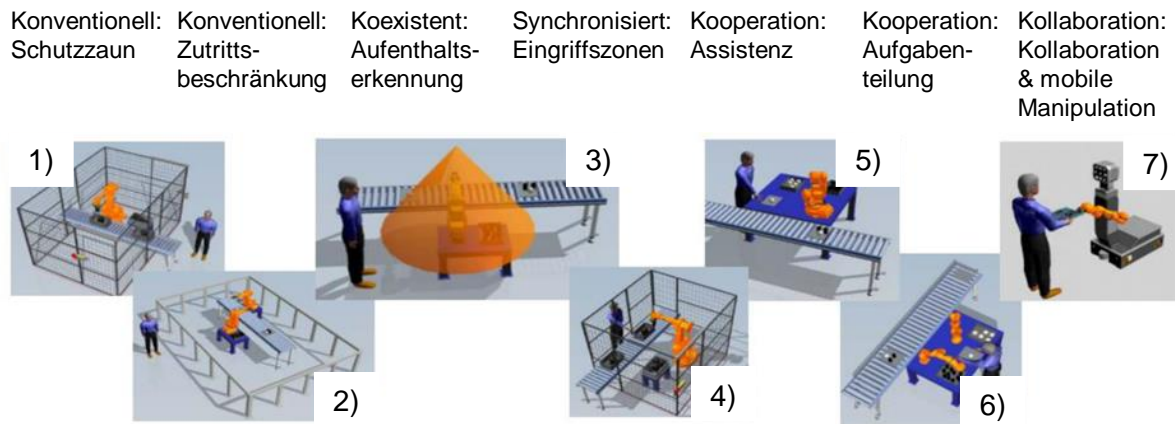


Abbildung 23 Spektrum einer Mensch-Roboter-Kooperation [64]

### 2.2.2 Prozessbeispiele einer sicheren Mensch-Roboter-Kooperation

Aus dem Spektrum der MRK lassen sich mehrere Prozessbeispiele für eine sichere MRK in der Montage ableiten, dargestellt in Abbildung 24. Als Stand der Technik wird die vollautomatisierte Roboterzelle mit fest installiertem Schutzzaun oder virtuellen Schutzzäunen mit einer Zutrittsbeschränkung beschrieben. Zu einem virtuellen Schutzzaun zählen alle nicht trennenden Schutz einrichtungen [65], beispielsweise Trittmatten oder Lichtgitter.



**Abbildung 24 Prozessbeispiele einer sicheren Mensch-Roboter-Kooperation [66]**

Bei dieser **konventionellen** Betriebsart befindet sich der Mensch außerhalb der Montagezelle im Produktionsbetrieb und der Schutzzaun bleibt geschlossen (vgl. Abbildung 24, 1 & 2). Sollte der Mensch im Produktionsbetrieb die Roboterzelle betreten, wird der Roboter in dieser Zeit sicher stillgesetzt. Die Kommunikation beschränkt sich auf das Auswerten von Diagnosedaten oder auf die Behebung von Störungen. Diese Phase der Kommunikation wird in der Fachliteratur [8, 64, 67] und der Norm [65] nicht als Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter beschrieben. Der Mensch und der Roboter arbeiten in strikt getrennten Arbeitsräumen und sind somit autonom hinsichtlich der jeweiligen Arbeitsinhalte. Die Wartung, Inbetriebnahme oder auch das Teach von Programmabläufen der Roboterzelle erfolgt durch fachlich unterwiesene Mitarbeiter. In dieser Phase wird die sicherheitsbezogene Betriebsart der Roboterzelle von einem sogenannten Automatikmodus zu einem manuellen Betriebsmodus gewechselt [65]. Die Betriebsarten eines Robotersystems werden genauer im Kapitel Industrieroboter erläutert. In einem manuellen Betriebsmodus dürfen Schutzeinrichtungen geöffnet bzw. unwirksam sein.

Verfügt das Robotersystem über eine Aufenthaltserkennung, welche den gesamten Arbeitsraum durch den Einsatz von nicht trennenden Schutzeinrichtungen überwacht und somit den Menschen im gefährlichen Arbeitsraum sicher detektieren kann, dann stoppt der Roboter und es kommt zu einem Anlagen-Not-Halt der Stopkategorie 0 gemäß IEC/EN 60204-1 [62], sobald sich der Mensch im Arbeitsraum des Roboters befindet [68]. Das Ausführen des Not-Halts beinhaltet das sofortige Unterbrechen der Energieversorgung, was zu einem direkten Stillsetzen der gefährlichen Bewegungen und der gefährlichen Prozessfunktionen der gesamten Anlage führt [68]. Nach dem Verlassen des überwachten Arbeitsraumes ist eine Entriegelung des Not-Halt-Kreises erforderlich [68]. Der Wiederanlauf erfolgt durch die Betätigung eines Zustimmschalters. Dieser wird in der MRK als eine **Koexistenz** bezeichnet (Abbildung 24, 3), ein nicht geplanter Aufenthalt des Menschen innerhalb des gefährdeten Arbeitsraums [64].



Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Beispielen gibt es auch das Eintreten des Menschen in den Arbeitsraum des Roboters im Arbeitsablauf der Montagestation. Die niedrigste Form der geplanten Überschneidung der Arbeitsräume zwischen Mensch und Roboter ist die Eingriffszone, welche einen Aufenthalt des Menschen in unmittelbarer Nähe mit teilweisem Kontakt mit dem Roboter ermöglicht. Der überschneidende Arbeitsraum wird durch nicht trennende Schutzeinrichtungen abgesichert und die Robotersteuerung ist nach DIN EN ISO 13849 [60] sicher gestaltet. Ein gleichzeitiges aktives Agieren zwischen Mensch und Roboter in den Eingriffszonen ist nicht möglich. Befindet sich der Mensch zeitgleich mit dem Roboter im gemeinsamen Arbeitsraum, wird der Roboter in einen Betriebshalt versetzt [2]. Gegenüber dem Not-Halt ist beim Betriebshalt eine schnellere Wiederaufnahme der unterbrochenen Prozessabläufe möglich, was im besten Fall zu einem automatischen Wiederanlauf führt. Solche Roboterzellen mit Eingriffszonen können für **synchronisierte** Prozessabläufe zwischen Mensch und Roboter in der Produktion eingesetzt werden (siehe Abbildung 24, 4).

Die bislang beschriebenen Prozessbeispiele können mit klassischen Industrierobotern unter Voraussetzung einer nach DIN EN ISO 13849 [60] ausgelegten Anlagensteuerung realisiert werden. Für die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter in einem gemeinsamen Arbeitsraum ohne zeitliche Synchronisation müssen die Robotersysteme mit einer sicheren Sensorik ausgestattet sein, welche einen Kontakt zwischen Robotersystem und Mensch sicher, gemäß der Norm ISO/TS 15066 [69], detektiert und somit ein Überschreiten der biomechanischen Grenzwerte verhindert. Die Sicherheitsfunktionen müssen die Anforderungen der Kategorie 3/PLd gemäß der Norm EN ISO 13849-1 [60] erfüllen [70]. Darüber hinaus sollte das Design des Robotersystems präventive Schutzmaßnahmen aufzeigen, um möglichst geringe Kräfte im Kollisionsfall zu erreichen [70], z.B. durch abgerundete Kanten, gepolsterte Elemente und möglichst geringe Traglasten [69].

Eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter in der Form der **Kooperation** (vgl. Abbildung 23, Abbildung 24 5 & 6) kann in der Ausprägung einer Assistenz oder einer Aufgabenteilung vorliegen [66]. Unterstützt der Roboter den Menschen in seinen Prozessabläufen, so kann der Roboter als Leistungsunterstützung oder als intelligente Werkzeugvorrichtung genutzt werden. Der Mensch führt das Robotersystem nicht mit einem Handbediengerät, sondern der Roboter bewegt sich an die gewünschte Position über Gesten oder über ein handgeführtes Bewegen des Roboterarms. Wohingegen bei der Aufgabenteilung der gemeinsame Arbeitsraum für Arbeitsabläufe unabhängig voneinander genutzt wird. Ein Teil der Arbeitsabläufe übernimmt der Mensch und den anderen Teil absolviert der Roboter. Nähert sich der Mensch oder steht in Kontakt mit einer vom Robotersystem ausgehenden Gefahr, wird dessen Verfahrensgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Robotersystem und Mensch sicher reduziert, bis hin zum Stillstand [1]. Die **Kollaboration** erfordert die höchste Sicherheitsanforderung an das Robotersystem (siehe Abbildung 24, 7). Hier arbeiten Mensch und Roboter ständig an einem gemeinsamen Arbeitsprozess. Über den



Arbeitsprozess besteht ein direkter Kontakt zwischen Mensch und Roboter. Der Prozess wird innerhalb der Montageoperation vom Menschen, aber auch durch den Roboter beeinflusst. Sowohl der Mensch als auch der Roboter sind in der Lage, auf Prozessabweichungen während einer Montageaufgabe zu reagieren. In dem gemeinsamen Arbeitsprozess wird durch sichere interne Sensorik vom Roboter die Montageoperation überwacht, sodass zu keiner Zeit eine Gefährdung von dem Robotersystem oder vom Arbeitsprozess selbst ausgehen kann.

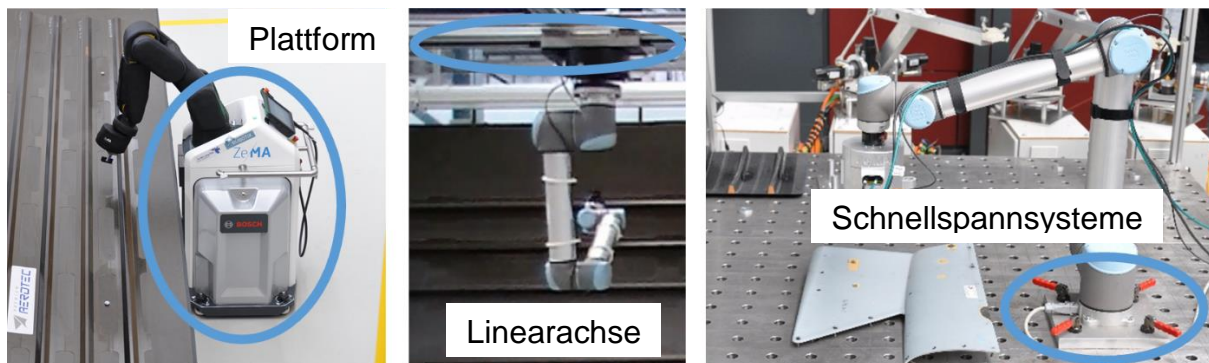
### 2.2.3 Fazit der MRK-fähigen Robotersysteme

In diesem Abschnitt werden die am Markt erhältlichen Robotersysteme, welche einen überschneidenden Arbeitsplatz zwischen Mensch und Roboter ermöglichen, herstellerübergreifend beschrieben. Robotersysteme mit der entsprechenden Sicherheitsfunktion für eine Mensch-Roboter-Kooperation werden als MRK-fähige Robotersysteme bezeichnet. [9, 71]

Die charakteristischen Eigenschaften von MRK-fähigen Robotersystemen werden von den verschiedenen Roboterherstellern unterschiedlich definiert, was zur Folge hat, dass die Roboterhersteller differente Konzepte verfolgen.

Allen Konzepten sind aber einige wichtige Merkmale gemein, nämlich die Mobilität, die schnelle Inbetriebnahme der Robotersysteme, die intuitive Bedienung des Robotersystems und der sichere Einsatz im kooperierenden Betrieb.

Verschiedene Konzepte wie Plattform-, Linearachs- und Schnellspannsysteme führen zu einer hohen Mobilität der Robotersysteme (Abbildung 25).



**Abbildung 25** Spektrum der Mobilität der Roboter in der Produktion: Plattform-, Linearachs- und Schnellspannsysteme

Ist das Robotersystem auf einer Plattform lokalisiert, kann es einfach, per Hand oder mit einfachen Mitteln wie z.B. Rollen, Hubwagen oder Luftkissen, auf- und umgestellt werden.

Der Roboter ist während der Bewegung im Produktionsprozess dynamischen Kräften ausgesetzt, weswegen eine Aufgewichtung der Plattform oder eine starre Verbindung mit dem Hallenboden bzw. der Prozessstation durch klassische Verschraubungen,

Einschubmodule oder magnetische Verriegelung, notwendig ist. Liegt eine derart mobile Plattform vor, ist die dazugehörige Robotersteuerung in der Plattform integriert. Im Falle von externen Sensoren wird die Plattform mit einer übergeordneten Steuerung ausgerüstet.

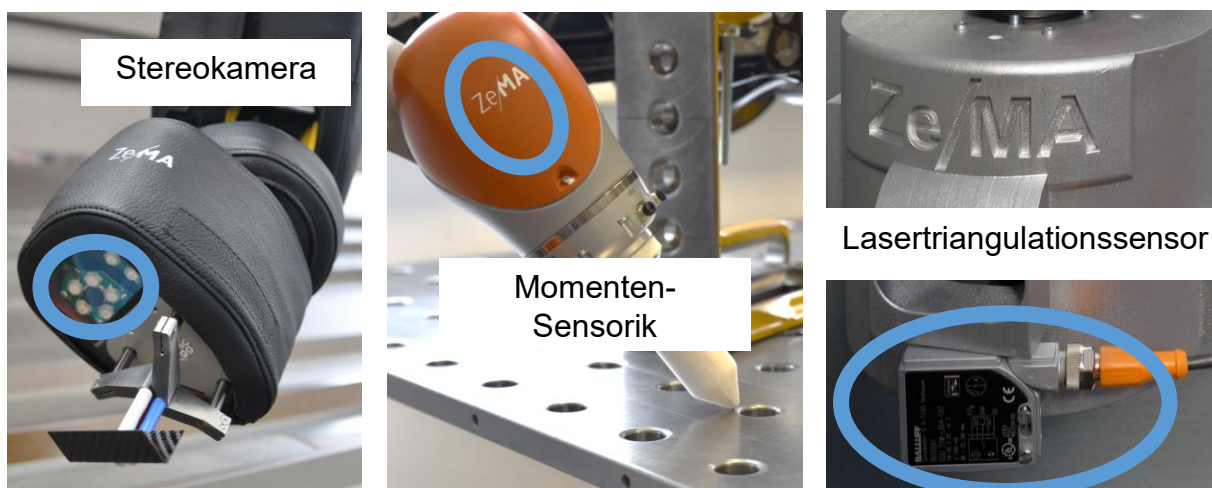
Indem ein MRK-fähiger Roboter innerhalb der Montagezelle, durch den Einsatz von z.B. Linearachsen und/oder Schnellspannsystemen, einfach versetzt werden kann, wird der Arbeitsraum von Mensch und Roboter optimal an die Anforderungen des Montageprozesses angepasst.

Roboter mit einem geringen Verhältnis von Eigengewicht zu Traglast eignen sich für diese Verwendung, wodurch der Aufwand für den Mitarbeiter gering gehalten wird und er den Roboter in der Montagezelle unkompliziert verschieben kann.

Die Mobilität der Robotersysteme ist nur dann wirtschaftlich, wenn durch den Umbau keine langen Stillstandzeiten entstehen. Der Roboter muss unmittelbar nach der Umsetzung wieder in Betrieb genommen werden. Wichtig ist dabei die schnelle Identifikation der Bezugskoordinatensysteme des Montagesystems, der Bauteile sowie der Roboterbasis und des Werkzeug TCP.

Sowohl Verfahren mit externen Messsystemen (Indoor GPS [72], Lasertracker) als auch Verfahren mit integrierter Kraftüberwachung bzw. mit optischen Sensoren (Abbildung 26) eignen sich für eine schnelle Messung, wobei optische Sensoren meist die wirtschaftlichste Lösung darstellen.

Durch das schnelle Einmessen ist es möglich, den Roboter grob am Aufstellungsort zu positionieren und anschließend die Roboterposition in Relation zu dem Bezugskoordinatensystem exakt zu bestimmen.



**Abbildung 26** Bestimmung der Bezugskoordinatensysteme durch Stereokamera, Momenten-Sensorik und Lasertriangulationssensor

Damit die Anpassung von Roboterapplikationen durch den Mitarbeiter, direkt auf dem betrieblichen Hallenboden, erfolgen kann, ist es wichtig, dass der Roboter einfach und ohne oder mit nur wenigen Roboterkenntnissen zu bedienen ist. Um die einfache Bedienung zu gewährleisten, bieten moderne Robotersysteme oftmals intuitive Bedienkonzepte. Beispiele dafür sind die direkte Vorgabe einer Bahn durch manuelle Führung der Roboterkinematik oder gestengesteuerte Programmierung [56].

Erst nach Auflösung der festen Grenzen zwischen Mensch und Roboter können die Vorteile einer MRK genutzt werden. Ein MRK-fähiges Robotersystem ermöglicht durch seine integrierten Sicherheitsfunktionen eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter ohne trennende Schutzeinrichtung, unter der Einhaltung der relevanten Normen und Richtlinien und einer Risikoanalyse [68 bis 70]. Die für eine MRK am Markt verfügbaren Robotersysteme sind durch verschiedene Sicherheitsstrategien zu unterscheiden. Um den sicheren Betrieb gemäß den Vorgaben zu ermöglichen, ist es zwingend notwendig, Kräfte und Geschwindigkeiten des Roboters anzupassen. Die Achsgeschwindigkeiten werden verringert, die Kräfte und Momente begrenzt und zusätzliche Sensoren angebracht, die zur Erfassung des Umfeldes mit einbezogen werden können [69].

Neben der Abschaltung des Roboters durch ein Überschreiten der Kraft-, Momenten- oder Leistungsgrenzen ist eine weitere technische Lösung die ständige Überwachung des definierten Arbeitsbereichs eines Roboters. Die Überwachung kann mithilfe von integrierten Sensoren oder mit externen Systemen, wie Laserscanner und Trittschaltmatten, umgesetzt werden. Der Roboter verringert die Geschwindigkeit oder schaltet sogar ganz ab, wenn sich ein Mitarbeiter im geplanten Arbeitsraum des Roboters befindet. Eine Gefährdung des Menschen wird damit ausgeschlossen. Verlässt der Mitarbeiter den Arbeitsraum wieder, ist in der Regel eine automatische Fortführung des unterbrochenen Programms vorgesehen.

Durch die beschriebenen Eigenschaften ermöglichen die Roboter neue Arten der Zusammenarbeit, indem die kognitiven und motorischen Fähigkeiten des Menschen mit der Präzision und Ausdauer des Roboters in einem Prozess kombiniert werden [9].

## **2.3 Schweißprozess im Sondermaschinenbau**

In diesem Kapitel findet die Analyse der Montage einer hochwertigen Schweißkonstruktion im Sondermaschinenbau statt. Die Analyse erfolgt durch die Beschreibung der Produktanforderungen mit den jeweiligen Schweißprozessen und der dafür verwendeten Betriebsmittel im manuellen und automatisierten Umfeld. Abschließend zeigt die Bewertung der Betriebsmittel im Sondermaschinenbau die Nachteile der bisherigen automatisierten Schweißarbeitsplätze auf und bildet die Grundlage für die Konzeption eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes, in dem die Anforderungen identifiziert und definiert werden.

## Aufgabenstellung im Sondermaschinenbau bezogen auf den Schweißprozess

Im Sondermaschinenbau gehört das Schweißen von kundenspezifischen Baugruppen zu einem der Schritte mit den höchsten Qualitätsansprüchen [73 bis 75].

Die Montage von hochwertigen Schweißkonstruktionen stellt eine besondere Herausforderung im Sondermaschinenbau dar, siehe Abbildung 27. Die am Markt geforderte Qualität der Schweißkonstruktionen lässt sich nur durch qualifizierte Facharbeiter bereitstellen [76]. Die Schweißkonstruktionen sind daher bislang geprägt durch einen hohen Anteil an manueller Tätigkeiten und führen zu einem geringen Produktionsvolumen. Durch den enormen Zeitdruck in der Auftragsabwicklung kommt es vermehrt zu fehlerhaften Schweißnähten an den Schweißkonstruktionen, die nur in Einzelfällen instandgesetzt werden dürfen bzw. können [76].

Die hohe Variantenvielfalt der Schweißkonstruktionen und deren kleine Stückzahlen haben zur Folge, dass die Vollautomatisierung von Prozessen entweder technisch nicht möglich oder häufig unwirtschaftlich ist [76]. Hinzu kommen die fehlenden Erfahrungen in der Programmierung der automatisierten Systeme, sodass diese nur begrenzt eingesetzt werden können.



**Abbildung 27 Herausforderung einer kundenspezifischen Auftragsfertigung im Sondermaschinenbau**

Nur durch eine fehlerfreie Montage der Baugruppen (First-Part-Right) kann eine effiziente Montage der Schweißkonstruktion sichergestellt werden. Die Anpassung des Produkts im Produktionsablauf ist im Bereich der Montage von Schweißkonstruktionen keine Seltenheit und erfordert eine schnelle Reaktionszeit im Montageprozess.

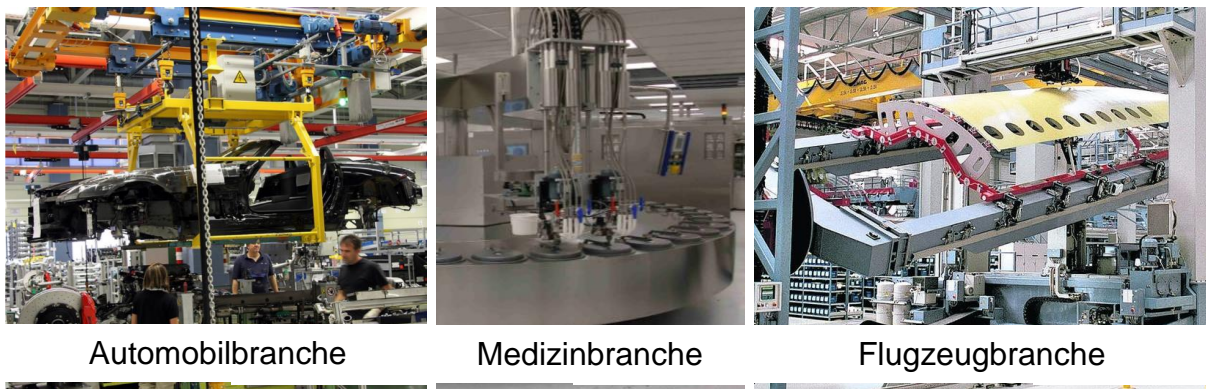
### 2.3.1 Produktspektrum

Der Zusammenbau von Schweißteilen oder Schweißbaugruppen zu einem höheren Erzeugnis wird als Schweißkonstruktion bezeichnet.



Die Auftragsfertigung von Schweißkonstruktionen beinhaltet die maßgeschneiderte Herstellung von Baugruppen oder Einzelteilen im Sondermaschinenbau. In der Regel stellen die Schweißkonstruktionen eine vormontierte Baugruppe und somit eine Komponente einer höherwertigen Baugruppe, beispielsweise einer Produktionsanlage, dar. In vielen Branchen ist die Herstellung einer Schweißkonstruktion erforderlich, dabei erfüllt die Schweißkonstruktion unterschiedliche Aufgaben in einer Produktionsanlage.

Die Einsatzbereiche einer Schweißkonstruktion sind vielseitig. Abbildung 28 zeigt exemplarisch den Einsatz verschiedener Schweißkonstruktionen vom Stahlbau in der Automobilbranche über den Anlagenbau in der Medizin- und Lebensmittelbranche bis hin zu Vorrichtungen in der Flugzeugbranche.



**Abbildung 28 Exemplarische Übersicht der Vielzahl an Schweißkonstruktionen [10, 77]**

Die Abbildung 29 veranschaulicht diverse Produkte einer Schweißkonstruktion. Die Dimensionierung und Auslegung der Produkte richtet sich nach den Anforderungen der Einsatzgebiete. Die Berechnung der Konstruktionen und Schweißverbindungen erfolgt auf der Grundlage der Festigkeitslehre und unterliegt je nach Anwendungsfeld zusätzlichen Vorschriften, Normen und Regelwerken.



**Abbildung 29 Verschiedene Produkte einer Schweißkonstruktion [10]**

Für die richtige Auslegung einer Schweißkonstruktion, wie beispielsweise die Wandstärke eines Behälters oder die Struktur eines Metallgestells, müssen folgende Randbedingungen der Konstruktion ermittelt werden.

- Welche Aufgabe erfüllt die Schweißkonstruktion?
- Wie wird die Konstruktion in der Anwendung beansprucht?
- Aus welchem Material ist die Schweißkonstruktion anzufertigen?
- Mit welchem Schweißverfahren könne die Anforderungen der Schweißkonstruktion sichergestellt werden?

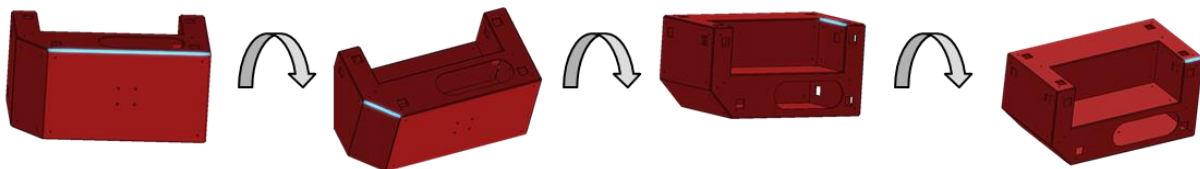
Desweiteren ist die geforderte Qualität der Schweißkonstruktion hinsichtlich der Festigkeit, Lebensdauer und Gefahrenmomente zu definieren. [78]

Die Schweißkonstruktionen im Sondermaschinenbau sind überwiegend individuelle Baugruppen und variieren stark in der Anzahl der zu montierenden Schweißkonstruktionen. Gerade bei geringen Losgrößen, z.B. bei der Montage von Flüssigkeitsbehältern für den Anlagenbau, werden die Behälter manuell durch erfahrene Schweißfacharbeiter gefügt. Wohingegen bei der Montage von Rohrverbindern mit einer hohen Stückzahl größtenteils mit einem automatisierten Schweißprozess gearbeitet wird.

### 2.3.2 Prozessvorstellung

In diesem Kapitel wird der Schweißprozess einer Schweißkonstruktion im Sondermaschinenbau anhand eines hochwertigen Stahlbehälters dargestellt.

Mit der Beauftragung einer kundenspezifischen Baugruppe beginnt die Entwicklung einer Schweißkonstruktion. In der Produktentwicklung werden die Baugruppen rechnergestützt konstruiert. Nach der Konstruktion des Bauteils werden die entsprechenden Schweißprozesse durch den Schweißfachingenieur ausgelegt und in Form einer Montageanweisung, im Schweißprozess als WPS bezeichnet, dokumentiert und beschrieben (siehe Kapitel 2.1.2). Unter anderem beinhaltet diese WPS das Schweißen der Baugruppe in einer vorgegebenen Schweißreihenfolge (vgl. Abbildung 30) sowie die Schweißposition der jeweiligen Montageprozesse.



**Abbildung 30** Schweißreihenfolge erfordert das Umorientieren der Baugruppe am Arbeitsplatz

Nach der Fertigung der Bauteile beginnt die Montage der Schweißkonstruktion. Die Montage der Baugruppe lässt sich in das Bauteilheften durch das Punktschweißen und in das Setzen der Schweißnähte unterteilen. Das Heften der Bauteile findet an einem

Vormontageplatz nach den Anforderungen der WPS für die Nahtvorbereitung statt (siehe Abbildung 31).


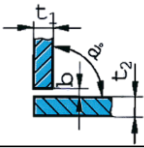

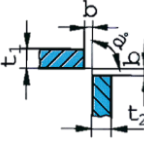
Benennung der Schweißnaht	Werkstückdicke $t$ [mm]	Fugenform	Maße			Bemerkungen
			Spalt $b$ [mm]	Steg $c$ [mm]	Winkel $\alpha$ [Grad]	
Kehlnaht 	3		= 0	-	70° ... 100°	T-Stoß
Kehlnaht 	> 3		= 0	-	70° ... 110°	Doppelkehlnaht, Eckstoß

Abbildung 31 Anforderungen der Nahtvorbereitungen des Bauteilclusters [74]

Desweiteren werden je nach verwendetem Werkstoff alle Öffnungen an der Baugruppe im Vormontageplatz abgedichtet. Das Abdichten der Schweißkonstruktion erfolgt händisch mittels einseitig mit Haftklebstoff beschichteten, streifenförmigen Trägermaterialien, wie beispielsweise Industrieklebeband (siehe Abbildung 32). Dies ermöglicht das Einleiten von Prozessgasen, welche den Sauerstoffgehalt innerhalb der Schweißkonstruktion reduzieren und dadurch die Qualität der Edelstahl-Schweißnähte steigert.

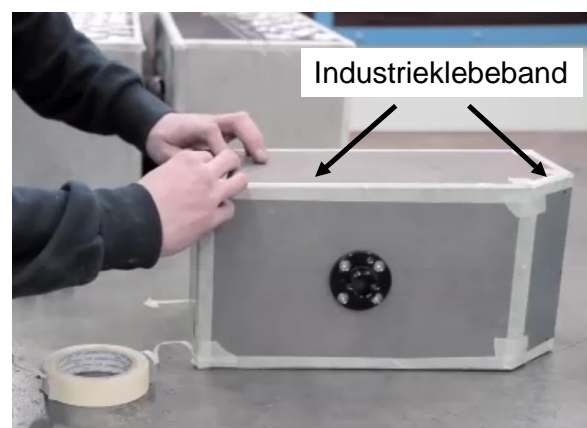


Abbildung 32 Heften (links) und Abdichten (rechts) der Schweißkonstruktion am Vormontageplatz [10]

Die An- und Ablieferung der Baugruppencharge in der jeweiligen Montagezelle erfolgt durch den Schweißfacharbeiter. Je nach Gewicht der Schweißkonstruktion werden Hub- und Hebeeinrichtungen sowie Flurförderzeuge eingesetzt.

Der Schweißarbeitsplatz wird durch den Facharbeiter auf das sequenzierte Fügen der Schweißnähte eingerichtet. Dabei muss, sowohl beim manuellen als auch beim automatisierten Schweißprozess, die Position der Schweißkonstruktion an die entsprechenden Arbeitsräume angepasst werden. Die zu schweißenden Nähte werden in die geforderte Schweißposition gebracht und mit Spannvorrichtungen fixiert, veranschaulicht in Abbildung 33. Je nach Größe und Komplexität der Konstruktion ist diese Rekonfiguration des Arbeitsplatzes mehrfach für die Fertigstellung einer Baugruppe erforderlich.



**Abbildung 33 Schweißnaht setzen an der vorpositionierten Schweißkonstruktion [10]**

Nach dem Einrichten des Arbeitsplatzes werden die jeweiligen Prozessparameter im Schweißgerät parametrisiert. In der Regel kommen für das manuelle bzw. teilmechanische Schweißen eines hochwertigen Schweißbehälters im Sondermaschinenbau die Schmelzschweißverfahren MIG/MAG – Schweißen und WIG-Schweißen zum Einsatz, welche zu den wichtigsten Schmelzschweißverfahren (Kapitel 2.1.2) zählen. Der Schweißfacharbeiter validiert den Schweißlichtbogen an einer Referenzbaugruppe und stellt damit die konsistente Qualität des manuellen Schweißprozesses sicher.

Im Anschluss beginnt das Setzen der Schweißverbindung unter der Berücksichtigung der WPS für die jeweilige Schweißverbindung (Abbildung 33). Dabei müssen die vorgeschriebenen Anforderungen eingehalten werden, um eine fehlerfreie Schweißnaht zu gewährleisten.



Nach der Fertigstellung der hochwertigen Schweißkonstruktion unterliegen alle Schweißverbindungen einer Qualifizierung der Baugruppe nach DIN EN ISO 15609-1 [74]. Dies beinhaltet das Erfassen aller beeinflussenden Faktoren der Schweißverbindung, „um damit die Schweißnähte als Verbindungselemente durch identifizierende und qualifizierende Angaben eindeutig zu beschreiben“ [48].

Vor dem Verpacken und Ausliefern der Schweißkonstruktion an den Kunden wird die geprüfte Baugruppe gereinigt und gegebenenfalls konserviert.

### **Mögliche Fehlerursachen bei der Herstellung einer qualifizierten Schweißverbindung**

Fehlerhafte Schweißnähte an einer Schweißkonstruktion können zu Rissen, Poren, Bindefehlern, Spritzern und einer ungünstigen Nahtgeometrie führen und erfüllen damit nicht die Anforderungen einer hochwertigen Schweißkonstruktion. Ein fehlerhafter Nahtverlauf führt zu einer nicht zulässigen Unregelmäßigkeit der Schweißkonstruktion. Die Unregelmäßigkeiten einer Schweißkonstruktion im Schmelz-Schweißen werden in sechs verschiedene Untergruppen unterteilt, welche nach DIN EN ISO 6520 gekennzeichnet sind [79].

1. Risse
2. Hohlräume
3. Feste Einschlüsse
4. Bindefehler und ungenügende Durchschweißung
5. Form- und Maßabweichungen
6. Sonstige Unregelmäßigkeiten

Die Ursache für einen fehlerhaften Nahtverlauf wird durch die falsche Auswahl von Prozessparametern sowie durch ein nicht optimales Führen des Schweißbrenners entlang der Schweißnaht hervorgerufen.

Nur ein optimales Zusammenspiel zwischen den Schweißparametern und der Bewegung des Schweißbrenners entlang der Schweißnaht führt zur geforderten Schweißnahtqualität.

Die strengen Vorschriften und Richtlinien bei der Herstellung einer hochwertigen Schweißkonstruktion im Sondermaschinenbau erschweren das Beheben von Fehlern an der Baugruppe durch ein sogenanntes Fertigungsschweißen. Der Grenzwert für die Unregelmäßigkeiten der vorliegenden Baugruppe ist so hoch, dass die Nacharbeit nur bedingt und mit einem hohen Kostenaufwand am Schweißarbeitsplatz durchgeführt werden kann.

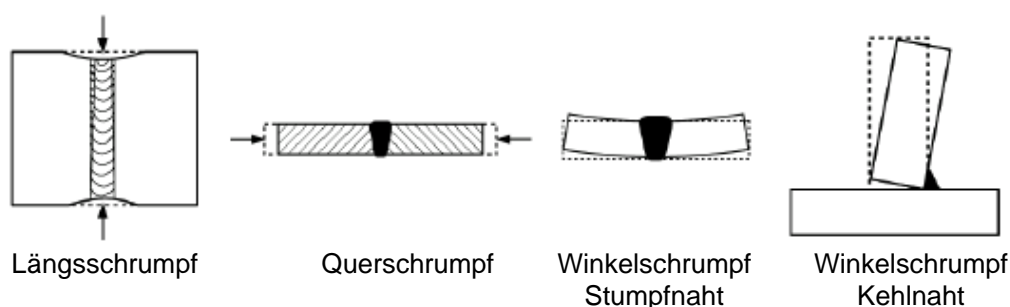
### **Eigenspannung und Verzug in der Schweißkonstruktion**

Die Eigenspannungen und der Verzug sind trotz des Einsatzes modernster Schweißverfahren nicht vollständig vermeidbar und beeinflussen damit die Fertigungsqualität der Erzeugnisse. Die Ursache für die Eigenspannung und den Verzug der Bauteile ist das Einleiten von thermischer Energie in die Schweißnaht, was zu einer inhomogenen Temperaturverteilung in der Baugruppe führt. Das durch den

Schweißprozess resultierende Erwärmen und abschließende Abkühlen verursacht eine nicht gleichmäßige thermische Dehnung in der Baugruppe. Die ungleichmäßige plastische Formänderung an der Baugruppe verursacht, selbst nach dem vollständigen Abkühlen, Schweißeigenspannungen und Verzug. Die erhöhte Temperatur an der Fugestelle reduziert ebenfalls die Steifigkeit und die Fließgrenzen, sodass die Widerstandsfähigkeit der Baugruppe sinkt. Die zulässigen Grenzwerte von Eigenspannung und Verzug sind unter anderem in der Norm DIN EN ISO 13920 definiert [80]. Je nach Genauigkeitsgrad sind im Kapitel „Allgemeintoleranzen für Schweißkonstruktionen“ alle notwendigen Kenngrößen für die zulässige Abweichung einer Baugruppe bezeichnet. [81, 82]

Die **Eigenspannung** beschreibt die verbleibenden inneren Spannungen in der Baugruppe und setzt sich aus der Wärmespannung und der Umwandlungsspannung zusammen. Die Wärmespannung tritt im Schweißnahtbereich auf und ist auf den wechselwirkenden Temperaturverlauf im Schweißprozess in Form der unterschiedlichen Dehnung und Schrumpfung zurückzuführen. Daher wird die Wärmespannung auch als Schrumpfspannung bezeichnet. Die Umwandlungsspannung ist die innere Spannung, welche durch unterschiedliche Gefügeumwandlungen hervorgerufen wird und für eine Volumenänderung im Bauteil sorgt. Dabei steht die Summe der Zwangsspannungen immer im Gleichgewicht mit sich. [48]

Der **Verzug** ist die planmäßige Abweichung der Baugruppe nach dem Schweißprozess und dem Abkühlen der Baugruppe auf Raumtemperatur. Dabei lässt sich der Verzug aus der Praxis in vier Arten unterteilen, aufgeführt in Abbildung 34. Unterteilt wird in Längs- und Querschrumpf, was eine Verkürzung der Baugruppe in Längsrichtung und quer zur Längsachse bedeutet. Die Kombination aus Längs- und Querschub wird als Verwerfung bezeichnet und äußert sich als eine unebene Oberfläche. Desweiteren wird ein Winkelschrumpf in Stumpf- und Kehlnaht gegliedert, welche die Abweichung der Winkellage der Bauteile zueinander bzw. das Durchbiegen der Baugruppe bei einer Stumpfnah bezeichnet. In der Praxis treten alle Verzugsarten in einer Kombination auf, was eine Berechnung und Behebung des Verzugs erheblich erschwert. [48]



**Abbildung 34 Verzugsarten an der Baugruppe [48]**

Die Höhe der Eigenspannung und die Größe des Verzugs werden durch die Geometrie und die Steifigkeit der geplanten Baugruppe beeinflusst. Dünne Blechbaugruppen mit einer geringen Steifigkeit haben dabei eine größere Formänderung als dicke Blechbaugruppen. Bei der Eigenspannung hingegen ist das Verhalten umgekehrt.

### **Minimierung von Eigenspannungen und Verzug in der Baugruppe**

Die Einflussfaktoren von Eigenspannungen und Verzug in der Baugruppe können generell in geometrische Faktoren (Nahtdicke, Maße, etc.), Faktoren durch die Werkstoffeigenschaften und Faktoren durch Verfahrenseinflüsse untergliedert werden. Unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren kann das geeignete Verfahren zur Minimierung von Eigenspannung und Verzug ausgewählt werden. Die vollständige Kontrolle für die Vermeidung von Qualitätsmängeln ist technisch nicht realisierbar. [81, 82]

Generell gilt, die Wärmeeinbringung beim Schweißen so gering wie möglich zu gestalten und somit den Verzug aller Arten zu reduzieren [48]. In Einzelfällen kann eine sehr starke Erhöhung der Energie beim Schweißen von Dünnblechen den Winkelverzug einer Kehlnaht reduzieren. Dies lässt sich durch eine homogenere Wärmeverteilung begründen [82]. Entscheidend für den Verzug in der Baugruppe ist das Verhältnis der Materialdicke zur eingebrachten Energie.

Der Schweißzusatz muss an die Auswahl der Grundwerkstoffe angepasst werden, dabei ist auf eine gute Duktilität und Dehnung besonders zu achten.

In der Gestaltung und Konstruktion der Baugruppe sollte möglichst auf dickwandige Konstruktionen verzichtet werden. Das Anordnen der Schweißnähte ist möglichst auf bzw. im Bereich der neutralen Achse der Baugruppe zu platzieren. Bei der Auslegung der Nahtdickenbegrenzung bei Kehlnähten sollten die Grenzwerte der eingebrachten Streckenenergie nach DIN 18800 nicht überschritten werden. Bei der Gestaltung der Schweißnähte sind Kreuzstöße möglichst zu vermeiden. Jedoch ist dies, aufgrund von produktrelevanten Randbedingungen, nicht immer möglich. In diesen Fällen ist die Schweißfolge entscheidend für die Größe der Eigenspannung [48].

Die **Schweißfolge** erläutert die Abfolge der Schweißnähte in einer Konstruktion und ist im Allgemeinen in einem Schweißfolgeplan beschrieben. Die Reihenfolge beeinflusst die Eigenspannung und den Verzug deutlich. Daher muss bei der Festlegung der Schweißfolge auf ein möglichst freies heranschrumpfen aller Bauteile geachtet werden. Dies bedeutet also für eine möglichst geringe Eigenspannung, dass Schweißarbeiten von der Mitte nach außen erfolgen und Versteifungsnähte der Baugruppe als letztes zu erstellen sind. Wird jedoch eine unter Beobachtung stehende, verzugsfreie Baugruppe gefordert, ist das Schweißen von Versteifungselementen zuerst zu absolvieren. [48]

Um die Geradlinigkeit und die Passgenauigkeit der Schweißkonstruktion zu erhöhen, werden häufig Hilfsvorrichtungen im Schweißprozess eingesetzt. Gängige Hilfsvorrichtungen sind Klammern, Knaggen und Spannvorrichtungen. Die

Hilfsvorrichtungen, welche vor dem Schweißprozess angelegt werden, sind jedoch meist sehr aufwendig in richtiger Position zu montieren. Bei der Verwendung von Hilfsvorrichtungen treten, neben dem geringen Verzug, hohe Eigenspannungen in der Baugruppe auf. Die hohe Eigenspannung kann zu einer erschwerten Bearbeitung der Baugruppe in nachfolgenden Montageprozessen führen. [48]

Neben dem Einspannen der Baugruppe können Baugruppen gezielt mit einer Vorspannung beaufschlagt werden. Durch eine gezielte gegenläufige Verformung im Vorfeld des Schweißprozesses kann die geforderte Maßhaltigkeit der Baugruppe sichergestellt werden. [48]

### 2.3.3 Betriebsmittelspektrum von manuell bis automatisiert

Das Schmelz-Schweißen im Sondermaschinenbau erfolgt in verschiedenen Graden der Mechanisierung. Das Spektrum der Mechanisierung erstreckt sich vom Handschweißen bis zum automatisierten Schweißen. Die Art der Mechanisierung bezieht sich auf das Positionieren der Schweißkonstruktion, auf das Zünden des Lichtbogens, auf die Position des Lichtbogens und der Vorschubgeschwindigkeit des Lichtbogens entlang der Schweißnaht. Entsprechend dem Betriebsmittelspektrum von manuell bis automatisiert lassen sich die Bewegungsabläufe und die Mechanisierung des Schweißens gemäß Abbildung 35 unterteilen. [42, 83]

Das **Handschweißen** im WIG-Schweißverfahren beinhaltet das manuelle Führen des Brenners und des Werkstücks, das manuelle Zuführen von Schweißzusätzen sowie das manuelle Handhaben der Schweißkonstruktionen durch den Schweißfacharbeiter.

Das **teilmechanische Schweißen** unterscheidet sich von dem Handschweißen nur durch die mechanische Zuführung der Schweißzusätze und kann im WIG- und MSG-Verfahren eingesetzt werden.

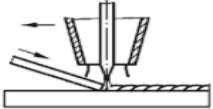
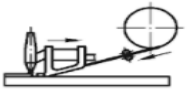
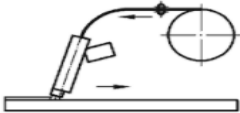
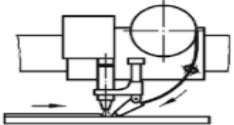
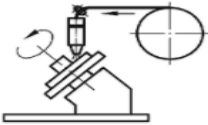
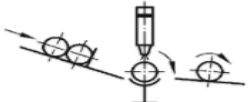
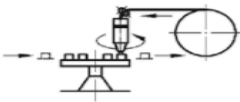
Benennung	Beispiele Schutzgasschweißen		Bewegungs-/ Arbeitsabläufe		
	Wolfram-Inertgasschweißen WIG	Metall-Schutzgasschweißen MSG	Brenner-/ Werkstück-führung	Zusatz-vorschub	Werkstück-handhabung
Handschweißen (manuelles Schweißen)		—	manuell	manuell	manuell
Teilmechanisches Schweißen			manuell	mechanisch	manuell
Vollmechanisches Schweißen			mechanisch	mechanisch	manuell
Automatisches Schweißen			mechanisch	mechanisch	mechanisch

Abbildung 35 Beispiele für die Einteilung nach dem Grad der Mechanisierung [42]

Unter dem **vollmechanischen Schweißen** versteht man das mechanische Führen des Schweißbrenners und des Werkstücks sowie das mechanische Zuführen der Schmelzzusätze. Das Handhaben der Schweißkonstruktion erfolgt im WIG- und MSG-Verfahren durch einen Produktionsmitarbeiter.

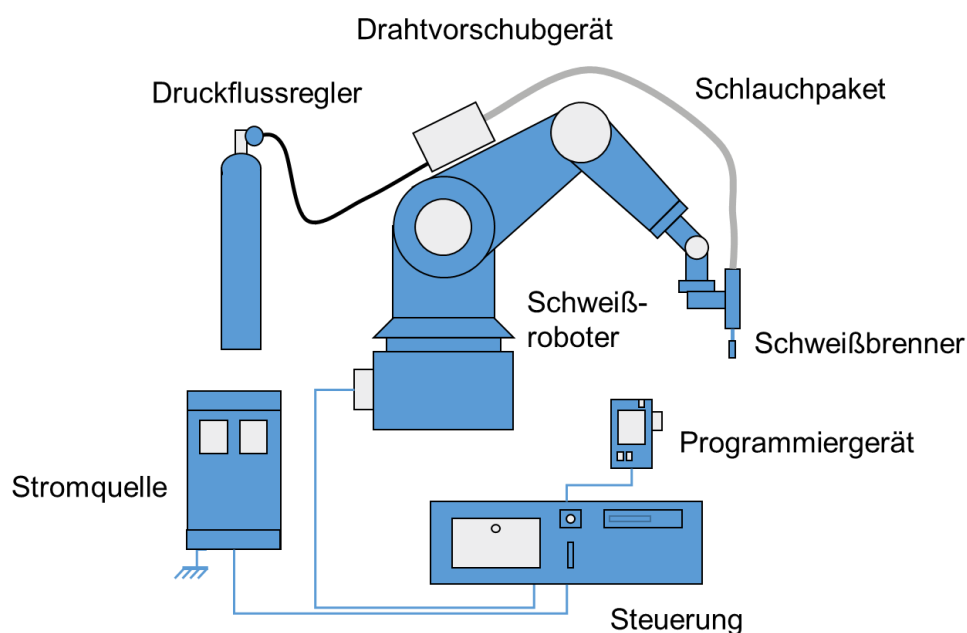
Bei dem **automatischen Schweißen** erfolgen alle Bewegungs- und Arbeitsabläufe, welche das Führen von Brenner und Werkstück, wie auch das Zuführen des Schmelzzusatzes, im WIG- und MSG-Verfahren mechanisch.

Für das mechanische Führen des Brenners wird in der Regel ein Robotersystem eingesetzt.

### Roboterbasiertes Schweißmontagesystem

Der prinzipielle Aufbau von Schweißrobotern für das MSG-Schweißen setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen (siehe Abbildung 36). Der Roboter und die technische Schweißausrüstung sind die wesentlichen Komponenten eines Schweißrobotersystems. Zusätzlich wird das Schweißrobotersystem, falls erforderlich, mit einer Werkstückpositionseinheit ergänzt. Nach dem DVS-Merkblatt 0922, T3 sind die Komponenten der schweißtechnischen Ausrüstung eines Schweißroboters beschrieben [39, 49, 84].

Die schweißtechnische Ausrüstung besteht aus der Schweißstromquelle, dem Drahtvorschubsystem, dem Schweißbrenner mit Zusatzausrüstung und der Schweißsteuerung mit Überwachung, welche meist in der Stromquelle integriert ist. Dabei wird über digitale Ein- bzw. Ausgänge eine Kommunikation zwischen Schweißgerät und Robotersteuerung hergestellt.



**Abbildung 36 Vereinfachter Aufbau einer vollautomatisierten Roboterschweißzelle zum MSG-Schweißen**

Je nach Steuerungsumfang beider Systeme können vorher gespeicherte Schweißprozesse aufgerufen werden und durch intelligente Prozessregelung die Qualität einer Schweißverbindung sichergestellt bzw. überwacht werden. Das Drahtvorschubsystem stellt ein gleichmäßiges Zuführen der Drahtelektrode im Schweißbrenner bereit. Dabei ist auf eine möglichst kurze Distanz zwischen Prozess und Vorschubsystem zu achten. Die Verbindung zwischen dem Drahtvorschubgerät und dem Schweißbrenner wird als Schlauchpaket bezeichnet. Das flexible Schlauchpaket stellt in der Regel das Zuführen der Drahtelektrode, das Einleiten des erforderlichen Schutzgases und das Übertragen des Schweißstromes bereit. Die Abbildung 36 veranschaulicht die Einzelkomponenten einer vollautomatisierten Roboterschweißzelle. [39]

### **Übersicht der in der Forschung und am Markt verfügbaren automatisierten Schweißarbeitsplätze**

Auf dem Markt gibt es viele Anbieter für automatisierte Schweißsysteme. Der automatisierte Schweißarbeitsplatz unterteilt sich in halbautomatisierte und vollautomatisierte Schweißsysteme.

Die halbautomatisierten Schweißsysteme werden meist für Reparaturschweißungen eingesetzt. Dabei wird die zu fügende Baugruppe in die Station manuell eingelegt und positioniert. Die Station wird durch ein Online-Programmierverfahren programmiert. Der Bediener kann direkt auf dem betrieblichen Hallenboden jede einzelne Schweißnaht positionieren und durch eine einfache Bedienoberfläche den Start und Endpunkt des Schweißprozesses bestimmen. Die programmierte Schweißnaht wird anschließend automatisiert abgefahren.

### Laserschweißarbeitsplatz Schunk PSM 400


 The image shows the Schunk PSM 400 laser welding workstation. It features a blue and grey industrial robot arm mounted on a base. A laser head is attached to the end of the arm. The workstation is designed for repair welding of tool steel and small series development. It includes a CNC-based control system and a height-adjustable, swivelable mounting table.	<p>Der entwickelte Laserschweißarbeitsplatz der Firma Schunk wurde speziell für das Reparaturschweißen von Werkzeugstahl und der Kleinserienentwicklung konzipiert. Das Funktionsprinzip PSM-400 Serie beruht auf einem linearachs-basierten Robotersystem mit einer CNC-basierten Steuerung. Die Schweißkonstruktion wird auf einem elektrisch höhenverstellbaren, beidseitig schwenkbaren Montagetisch befestigt.</p> <p>Die online Programmierung der Laserschweißstation wird durch Teach-In Funktionen unterstützt, womit einfachste Bewegungen des Werkzeugs programmiert werden. Eine integrierte Sensorführung reguliert den optimalen Abstand der Laseroptik. Je nach spezifischen Eigenschaften der Werkstoffe können die Laserparameter angepasst werden. [85]</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abbildung 37 Laserschweißarbeitsplatz Schunk PSM 400 [85]

### CoWelder Migatronic Automation

 The image shows the CoWelder Migatronic Automation robotic welding workstation. It consists of a robotic arm with a blue and grey finish, mounted on a base. A welding torch is attached to the end of the arm. The workstation is designed for welding simple welding structures. It includes a welding power source and a robotic arm from the company Universal Robots.	<p>CoWelder der Firma Migatronic Automation wurde für das Schweißen von einfachen Schweißkonstruktionen entwickelt. Der kompakte Aufbau besteht aus einer Schweißstromquelle und einem Roboterarm der Firma Universal Robots.</p> <p>Die online Programmierung erfolgt durch eine grafische Bedienoberfläche, in der verschiedene Bewegungsabläufe, ohne spezielle Roboterkenntnisse, programmiert werden können. Handgeführtes Teach-In- und Playback-Verfahren erleichtern das Programmieren von Schweißnähten mit komplexen Bewegungsabläufen. Die Parametrierung der Schweißparameter erfolgt an der Stromquelle, unabhängig von der Robotersteuerung. Die erstellten Schweißanwendungen können abgespeichert und bei Bedarf erneut ausgeführt werden.[86]</p>
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Abbildung 38 Halbautomatisierter Roboterschweißplatz CoWelder – Migatronic Automation [86]

Bei den vollautomatisierten Schweißsystemen werden überwiegend Industrieroboter eingesetzt, die in einer abgeschlossenen Schweißzelle die Baugruppen verschweißen. Die vollautomatisierten Schweißsysteme sind vollständig computergesteuert. Die geforderten Schweißprozesse werden für jede Variante fest gespeichert hinterlegt und sind an die Geometrien der Schweißkonstruktionen und den Werkstoffen der Baugruppen gebunden. Für mehrere Schweißkonstruktionen muss jeweils ein neuer Datensatz programmiert werden. Die Programmierung der Robotersysteme erfolgt durch einen Roboterexperten mittels Online- und/oder Offline-Programmierverfahren. Neben den reinen Programmierverfahren der Schweißverbindungen bieten CAD-basierte Simulationsumgebungen weitere Funktionen für die sichere Inbetriebnahme der Schweißrobotersysteme an. Die softwaregestützte Programmierungsumgebung generiert automatisch ein kollisionsfreies Bewegen des Roboterarms und überprüft, ob es während der Programmausführung Kollisionen mit anderen Objekten innerhalb der Schweißzelle gibt. Für das Einhalten und Optimieren von Fertigungstoleranzen findet ein hochgenaues Vermessen aller relevanten Komponenten der Station statt. Vereinzelt können, je nach Roboterschweißkonzept, die Abweichungen der Modelle von der Realität nur bedingt durch den Einsatz von zusätzlicher Sensorik kompensiert werden.

### Konventionelle vollautomatisierte Roboterschweißzelle



Die Roboterschweißzelle „flexibleCube“ der Firma Kuka ist eine standardisierte Schweißzelle, welche für die Produktion von sicherheitsrelevanten Schweißkonstruktionen in der Großserie konzipiert ist. Die Schweißzelle verfügt über einen modularen Stationsaufbau und kann mit bewährten Schweißausrüstungen führender Hersteller kombiniert werden. Das Be- und Entladen der Zelle erfolgt manuell mittels Drehtisch, wodurch die Stillstandzeiten des Schweißroboters beim Bestücken der Schweißvorrichtungen reduziert werden. Die Programmierung und Prozessentwicklung erfolgt in der Regel durch den Systemintegrator. Für das Anpassen und Erweitern von Schweißnähten sind konventionelle Roboterkenntnisse im Bereich der Programmierung und Bedienung erforderlich, welche in einem manuellen Betriebsmodus erfolgen. [87]

**Abbildung 39** Vollautomatisierte Roboterschweißzelle der Firma Kuka „flexibleCube“ [87]



### Vollautomatisierte Roboterschweißzelle mit Sensorik



Die vollautomatisierten Roboterschweißsysteme der Firma Servo-Robot bestehen aus den klassischen Komponenten eines Schweißroboters und sind mit einer zusätzlichen Sensorik für das Lichtbogenschweißen ausgestattet. Die Programmierung der Schweißapplikation erfolgt im manuellen Betriebsmodus über das Offline-Programmierverfahren. Neben der Programmierung des Schweißprozesses ist das Implementieren der Sensoren für die jeweilige Schweißnaht erforderlich. Das sensorbasierte Messkonzept wird für die Nahtverfolgung, die Überwachung, die Inspektion der Nahtverläufe und die intelligente Prozesssteuerung eingesetzt. Damit können die im Herstellungsprozess entstehenden geometrischen und prozessorientierten Abweichungen an der Schweißkonstruktion unter bestimmten Systemgrenzen kompensiert werden. [88]

**Abbildung 40** Vollautomatisierte Roboterschweißzelle mit externem Sensorsystem der Firma Servo-Robot GmbH [88]

### Vollautomatisierte Roboterschweißzelle mit CAD gestützter Programmierung und Sensorik im Forschungsbereich



Die vollautomatisierte Roboterschweißzelle des Fraunhofer Institut für Produktionstechnik, mit CAD gestützter Programmierung und Sensorik, ist Teil eines Forschungsprojekts „SMErobotic“. Schwerpunkt des Forschungsprojektes ist die Entwicklung einer vollautomatisierten Roboterschweißzelle für die Produktion kleiner und mittlerer Losgrößen. Das Schweißrobotersystem verfügt über das klassische Playback-Teachverfahren, wodurch der Roboter entlang der gewünschten Bahn von Hand geführt wird. Mithilfe einer grafischen Programmierungsumgebung findet die Bahnbearbeitung und Parametrierung der Prozessdaten statt. Die Roboterzelle wird mittels konventioneller Zutrittsberechtigung abgesichert. Befindet sich der Worker in der Roboterzelle, ist ein Manipulieren der kinematischen Struktur nur im manuellen Betriebsmodus möglich. Durch den Einsatz von zusätzlicher Sensorik erfolgt das Einmessen des Bauteils über einen Abgleich zwischen CAD-Modell und Sensordaten. Dabei wird die



Schweißbahn an die zu erreichenden Toleranzen der Schweißkonstruktion angepasst und eine vollautomatische Schweißverbindung hergestellt. [89, 90]

**Abbildung 41 Vollautomatisierte Roboterschweißzelle aus dem Forschungsbereich des Fraunhofer IPA [89]**

## **2.4 Bewertung der Betriebsmittel im Sondermaschinenbau**

### **Arbeitsplatzgestaltung**

Die bisher am Markt und in der Forschung vorliegenden Lösungsansätze der automatisierten Schweißarbeitsplätze entsprechen nicht den Anforderungen im Sondermaschinenbau für die Produktion von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen. Die Montagearbeitsplätze sind strikt in manuelle und automatisierte Montagestationen unterteilt und können nicht aufeinander abgestimmt werden. Dabei gibt es vereinzelte Ansätze für das vereinfachte Programmieren von vollautomatisierten Robotersystemen, jedoch liegt bislang kein ganzheitliches Konzept für die teilautomatisierte Montage einer Schweißkonstruktion vor. Die strikte Trennung der Tätigkeiten zwischen manuell und automatisiert erschwert die Gestaltung einer effizienten Montage von hochwertigen Schweißkonstruktion.

### **Steuerung**

Eine Kombination aus verschiedenen Lösungsansätzen ist aufgrund der überwiegend herstellergebundenen Systemansätze nur bedingt möglich und verhindert meist die individuelle Gestaltung des Steuerungskonzepts für den Sondermaschinenbau in kleinen Unternehmensstrukturen. Die Folge sind Systemlösungen, die meist in Verbindung mit einem hohen Aufwand und hohen Betriebskosten stehen. Die im Sondermaschinenbau geforderte bedarfsgerechte Automatisierung der Schweißprozesse kann nicht durch die Reduktion von Funktionsumfängen aus dem vollautomatisierten Schweißen in der Großserie abgebildet werden. Der Einsatz von zusätzlicher Sensorik steigert zwar die Flexibilität des Robotersystems und führt zu einer Steigerung der Qualität einer Schweißverbindung, erfordert jedoch eine Fachkraft im Bereich der Robotik und der Automatisierungstechnik, um die komplexen Steuerungs- und Programmiervorgänge in sich ständig ändernden Schweißprozessen zu implementieren.

## **Programmierung und Bedienung**

Die bisherigen Ansätze in der Programmierung vernachlässigen meist die Verknüpfung der virtuellen Daten mit den realen Werkstückdaten. Die Roboterprogramme werden entweder manuell online geteacht oder offline in einer Simulation erstellt und dann aufwendig in der realen Zelle angepasst. Während des Teachens der Punkte oder dem Anpassen der Programme in der Zelle muss das Produktionssystem stillgesetzt werden und kann nicht produzieren. Bei jedem Produkt- oder Variantenwechsel entstehen so lange Stillstandzeiten. Keines der bisherigen Montagesysteme unterstützt den Schweißfacharbeiter bei der Re-/Konfiguration des Schweißarbeitsplatzes. Die gesamtheitliche Planung von Arbeitsabläufen unter Berücksichtigung der WPS wird nicht beachtet. Eine flexible Anpassung der Prozessabläufe direkt auf dem betrieblichen Hallenboden ist nicht möglich ohne fortgeschrittene Roboterkenntnisse. Daher können solche Systeme nur bei großen Stückzahlen eingesetzt werden, bei denen sich der hohe Einrichtungsaufwand lohnt. Für die Produktion von kleinen Serien sind solche Systeme nicht wirtschaftlich.

## **Sicherheit**

Das Einrichten und Programmieren der Roboterzellen erfolgt bislang immer in einem Handbetrieb [70], worin die Schutzeinrichtung geöffnet bzw. unwirksam ist und der Roboter mit einer reduzierten Geschwindigkeit von 250 mm/s, nur in Verbindung eines Zustimmungsschalters verfährt [65]. Laut der Normen und Richtlinien der Industrieroboter darf dieser manuelle Betriebszustand nur durch den Anlagenbauer oder durch speziell geschultes Personal betrieben werden [70]. Das geschulte Personal ist mit den bestehenden Gefahren eines Roboters vertraut und kann somit das Gefahrenpotential abschätzen. Gerade bei KMU liegt die Erfahrung und Qualifizierung im Schweißprozess und nicht in der Robotik. Die weitere Schulung und Qualifizierung zu einem Roboterinbetriebnehmer ist mit hohen Kosten verbunden, was den Einsatz von vollautomatisierten Schweißzellen nur selten wirtschaftlich gestalten lässt.

## **Prozesswerkzeug**

Die Prozesswerkzeuge der halbautomatisierten Roboterschweißzelle sind meistens modifizierte Brennersysteme eines manuellen Schweißgeräts, welche über eine einfache Klemmvorrichtung mit dem Roboterflansch verbunden sind. In der Regel existiert bei diesen Prozesswerkzeugen kein mathematisches Modell der Beziehungen zwischen Roboterflansch und TCP, was zu hohen Toleranzen im Schweißprozess führt und ausschließlich nur in Verbindung mit einem Playback-Programmierverfahren und präzisen Spannvorrichtungen genutzt werden kann. Eine schnelle Inbetriebnahme der Station nach einem Produktwechsel ist daher nur begrenzt möglich.

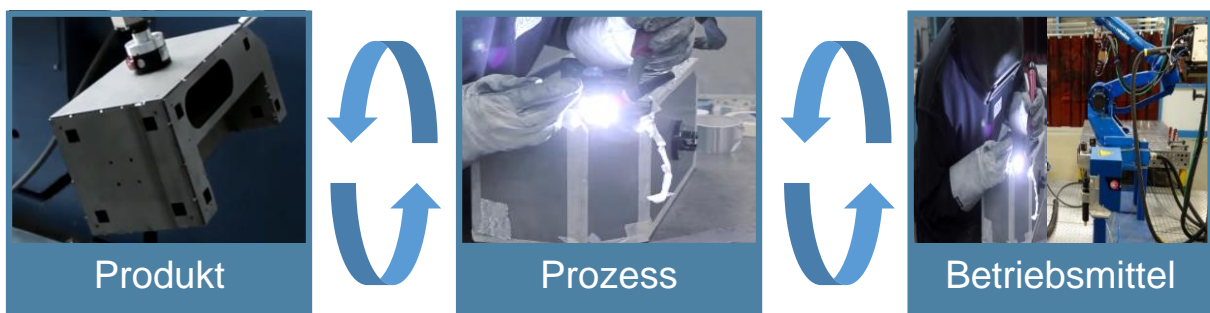
**Messkonzept**

Flexible vollautomatisierte Roboterschweißsysteme verfügen meist über externe Sensoren, jedoch beziehen sich diese überwiegend auf die Inspektion und Nahtverfolgung einer Schweißverbindung und nicht auf das Einrichten einer Roboterzelle. Aus diesem Grund ist die bisher verwendete Messtechnik für den Sondermaschinenbau zu aufwendig und nicht wirtschaftlich, um alle Einflussgrößen einer individuellen Schweißkonstruktion nach einer Rekonfiguration der Montagestation zu identifizieren und verhindert dadurch die automatische Lokalisierung der Schweißkonstruktion am Schweißarbeitsplatz.

### 3 Entwicklung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebene Methode für die Entwicklung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes erfolgt am Beispiel einer kundenspezifischen Schweißkonstruktion. Teilergebnisse der Methodik wurden im Vorfeld veröffentlicht, hierzu zählt unter anderem das Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration des Hanser Verlags aus dem Jahre 2019 mit den Herausgebern Rainer Müller, Jörg Franke, Dominik Henrich, Bernd Kuhlenkötter, Annika Raatz und Alexander Verl. [91]

Im Rahmen der Forschungsprojekte Horizon 2020 FourByThree und TRSE wird ein übergreifender Ansatz zur Analyse des Produkts und des Zusammenwirkens von Produkt, Prozess und Betriebsmittel im Produktionsablauf (vgl. Abbildung 42) gewählt.



**Abbildung 42 Produkt-Prozess-Betriebsmittel [10]**

Anhand der Beschreibung des operativen Produktentstehungsprozesses (Kapitel 3.1), der Planung der Montageprozesse (Kapitel 3.2, Fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung) und der Auslegung des Montagesystems (Kapitel 3.3, Auslegung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes) erfolgt die Entwicklung eines effizienten teilautomatisierten Arbeitsplatzes durch das Zusammenspiel der Betriebsmittel mit dem Produkt.

#### **Zielbild des teilautomatisierten Arbeitsplatzes**

Am Anwendungsbeispiel einer Schweißkonstruktion werden die Anforderungen und Randbedingungen für die Entwicklung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes abgeleitet und in einer Entwicklungsumgebung validiert.

Das Zielbild eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes für eine effiziente, fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter sowie die Arbeitsplatzgestaltung einer bedarfsgerechten Automatisierung ist in Abbildung 43, am Beispiel eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes, veranschaulicht.

Der zu entwickelnde Arbeitsplatz erfüllt dabei folgende Aufgaben:

- die intuitive Prozessplanung von kundenspezifischen Baugruppen
- die sichere und effiziente Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter (Schweißkabine, Schutzelemente MRK, fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung)
- eine intelligente Assistenzfunktion der Mitarbeiter während der Planung, der Rekonfiguration und der operativen Montage (Bedienkonzept, Projektionssysteme)
- die Einhaltung der Prozessfähigkeit der Montageprozesse (WPS-Assistenzfunktionen, Messstrategie)

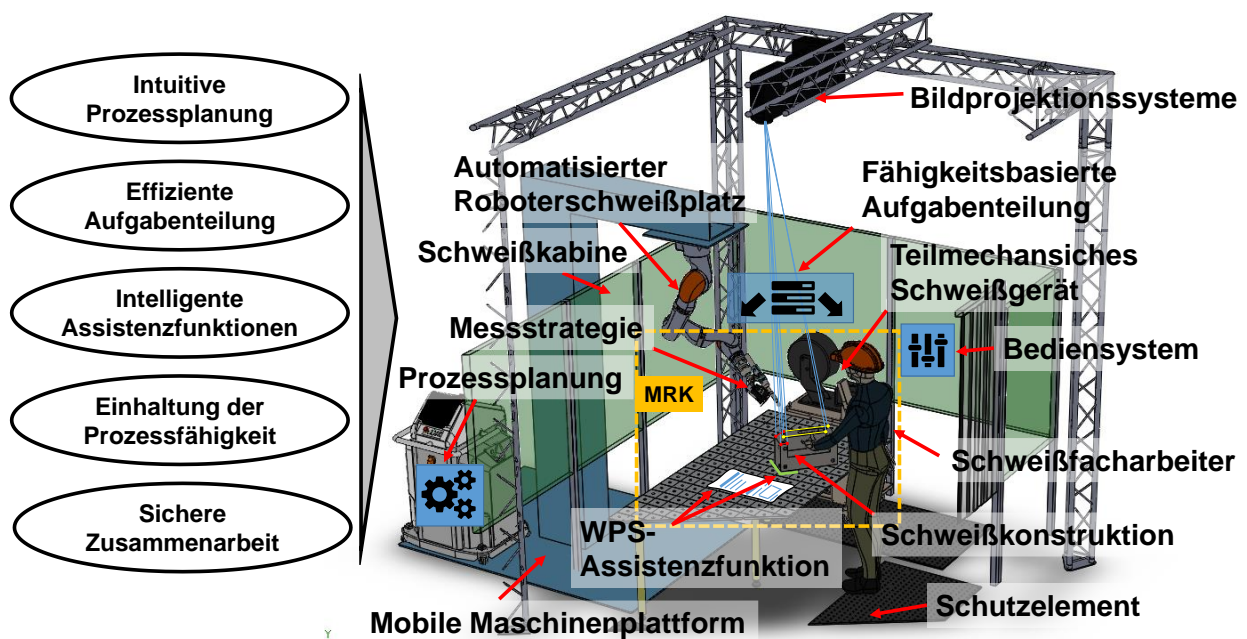


Abbildung 43 Zielbild des teilautomatisierten Arbeitsplatzes am Beispiel eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes

### 3.1 Randbedingungen für die Entwicklung des Schweißarbeitsplatzes

Die Entwicklung des Zielbildes erfordert die Auswahl einer kundenspezifischen Schweißkonstruktion sowie die Analyse des operativen Produktentstehungsprozesses, welche in folgenden Unterkapiteln erläutert wird.

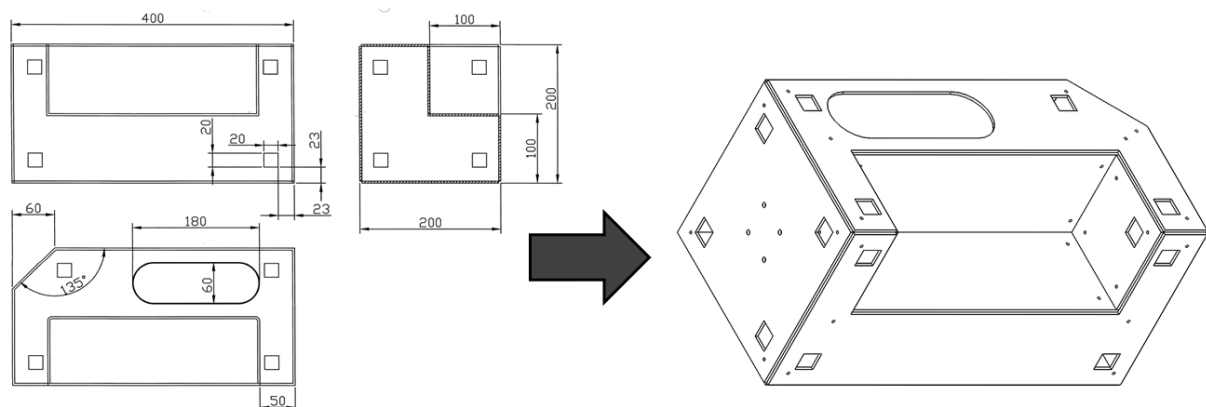
#### 3.1.1 Auswahl einer kundenspezifischen Schweißkonstruktion

Die Auftragsfertigung im Sondermaschinenbau erfordert die Montage von unterschiedlichsten Schweißkonstruktionen und -teilen, wie in Kapitel 2.3.1 erläutert. Einen teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz zu entwickeln, der die komplette Auftragsfertigung im Sondermaschinenbau abdecken kann, ist aufgrund der unterschiedlichen Teile nur bedingt möglich.



Im ersten Arbeitsschritt der Entwicklung wird die Aufgabenstellung des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes durch die Auswahl von kundenspezifischen Schweißkonstruktion abgegrenzt. Die Grundlage dafür stellt der Anlagenentstehungsprozess einer Montageanlage für die Medizintechnik dar. Ein wesentlicher Bestandteil des Anlagenentstehungsprozesses ist die Herstellung einer hochwertigen Schweißkonstruktion nach den Normen, Richtlinien und technischen Regeln der Medizinbranche. Eine besondere Herausforderung der Schweißkonstruktionen in der Medizintechnik stellt das Schweißen von Behältern dar, welche mit extrazellulärer Flüssigkeit, z.B. dem Blutplasma, in Kontakt treten. Diese hochwertigen Schweißbehälter unterliegen strengen Richtlinien im Hinblick auf die Gestaltung der Baugruppe [92], des Qualitätsmanagements [75] und des Risikomanagement [93].

Um die Herausforderungen von Schweißkonstruktionen möglichst detailliert abzudecken, wird der teilautomatisierte Schweißarbeitsplatz anhand der Montage des hochwertigen Schweißbehälters in der Medizintechnik entwickelt. Ein ausgewählter Flüssigkeitsbehälter ist beispielsweise in Abbildung 44 dargestellt und definiert die Randbedingungen der Systemauslegung eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes.



**Abbildung 44 Montageprozesse von hochwertigen Schweißkonstruktionen**

Die hochwertige Schweißkonstruktionen bestehen meist aus Edelstahl (V2A X2CrNi12 nach DIN EN 10027-2) [94]. Diese Schweißkonstruktionen mit einer Blechstärke von 3 Millimeter besitzen eine Vielfalt an Ecken und Kanten. Die Baugruppen verfügen über eine hohe Anzahl an Schweißnähten und erfordern im operativen Produktentstehungsprozess eine hohe Anzahl an Arbeitsschritten. Die Länge der linearen Schweißnähte liegt zwischen 30 und 400 Millimeter und bedarf unterschiedlicher Schmelzschweißverfahren. Die Montage solcher Schweißbehälter erfordert einfache, aber auch sehr komplexe Bewegungsabläufe beim Führen des Brenners während des Schweißprozesses.

Die Baugruppen unterliegen den Allgemeintoleranzen für Schweißkonstruktionen nach DIN ISO 13920 [80]. Der geforderte Genauigkeitsgrad ist mit der Kategorie A beschrieben, was eine zulässige geometrische Verformung an der fertigen Baugruppe kennzeichnet. Die zulässigen Abweichungen für Längenmaße  $\Delta l$  und Winkelmaße  $\Delta \alpha$  bei einer Schweißkonstruktion mit einer Länge  $l$  von über 120 bis 400 Millimeter betragen  $\Delta l = \pm 1$  Millimeter und  $\Delta \alpha = 0,05$  Grad.

### **3.1.2 Fokus operativer Produktentstehungsprozess einer Schweißkonstruktion**

Die Produktionsabläufe für die Herstellung von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen lassen sich in vier Bereiche unterteilen. Für die Analyse der Arbeitsinhalte ist das Erfassen der Produktionsabläufe in enger Absprache mit den jeweiligen Mitarbeitern erforderlich. Das Erfassen der Produktionsabläufe startet bei der Entwicklung und Konstruktion des Produktes und endet mit der Fertigstellung aller Arbeitsinhalte in der Endmontage.

#### **Arbeitsinhalte im Entwicklungsbereich und der Teilefertigung**

Die Analyse der Arbeitsinhalte im Entwicklungsbereich zeigt eine Unterteilung im Produktentstehungsprozess zwischen der Konstruktionsabteilung und der Produktionsentwicklung. Dabei werden unterschiedliche Softwareprogramme für die Konstruktion und Prozessentwicklung verwendet. Nach dem Konstruieren des Produkts mittels rechnerunterstützter Software findet die Auslegung der Fügeprozesse statt. Der Schweißfachingenieur legt, neben der Schweißreihenfolge, die erforderlichen Prozessparameter fest und bereitet die Schweißvorschrift in einem standardisierten Datenformat mittels Tabellenkalkulationsprogramm vor. Abschließend werden alle Produktionsdateien inklusive Projektdokumentation erstellt und an den betrieblichen Hallenboden übergeben (siehe Tabelle a im Anhang).

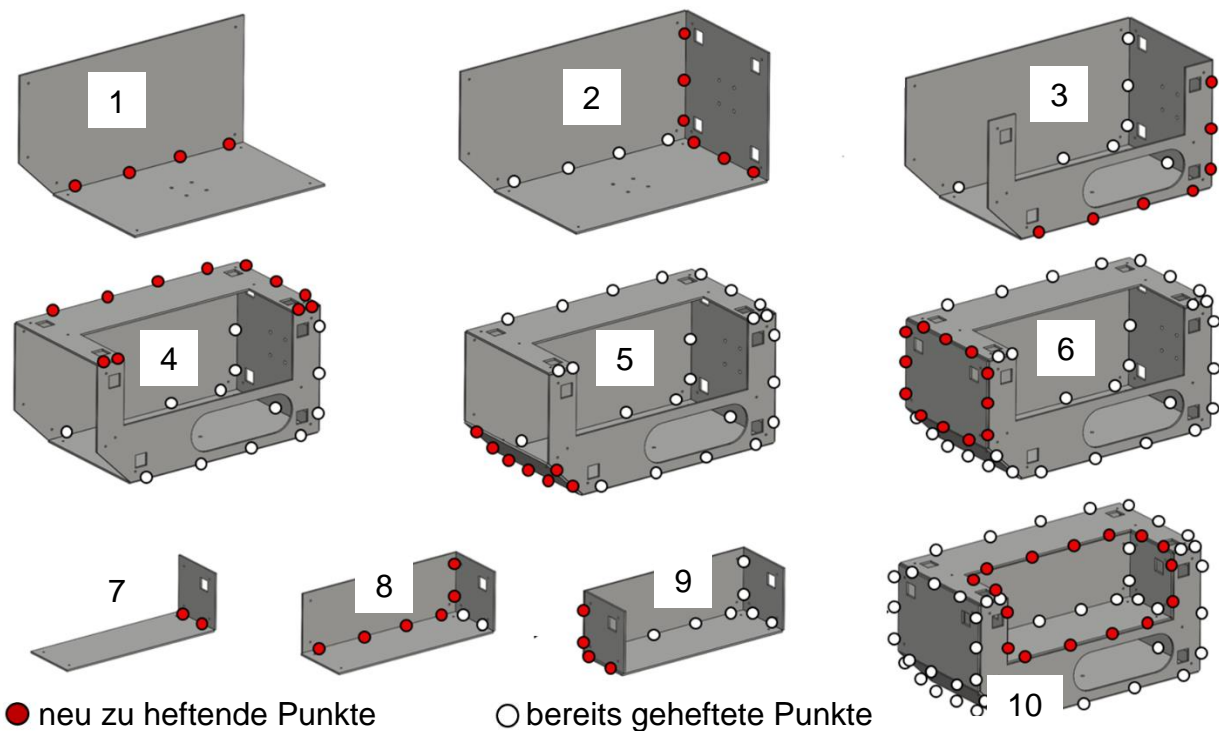
Im Bereich der Logistik erfolgt nach der Übermittlung der Projektdokumente die Bestellung der Materialien und nach dem Wareeingang findet die geforderte Konfektion der Materialien statt. Die projektspezifischen Materialien werden an die Teilefertigung ausgeliefert. Der Fertigungsbereich beginnt mit dem Einrichten der Laserschneidanlage und bestückt die Station mit den projektspezifischen Blechbauteilen. Das Programmieren der Laserschneidanlage erfolgt mittels rechnerunterstützter Konstruktionsformate und wird durch den Facharbeiter ausgeführt. Die fertiggestellten Bauteile werden entladen und in Transportkisten platziert (siehe Tabelle b im Anhang).

#### **Arbeitsinhalte in der Vormontage und der Endmontage**

Die Montage ist in die Vormontage und in die Endmontage unterteilt. In der Vormontage werden die Schweißkonstruktionen geheftet. Für das Heften sind mehrere vorgelagerte Arbeitsinhalte erforderlich. Nach der Anlieferung der Bauteile aus der Teilefertigung ist das Einrichten der Montagestation durch den Schweißfacharbeiter erforderlich. Neben der Auswahl der Schweißparameter, welche manuell im



Schweißgerät eingestellt werden, ist ein Justieren der Bauteile bzw. der Baugruppe erforderlich. Für ein optimales Justieren und Positionieren der Bauteilgruppen stehen dem Schweißfacharbeiter flexible Schnellspannsysteme zur Verfügung. Im Anschluss erfolgt das Setzen der Schweißpunkte zum Fügen der Bauteile und der Baugruppen der Schweißkonstruktion. Die Schweißpunkte werden durch den Facharbeiter im Abstand von wenigen Zentimetern entlang der zu erstellenden Schweißnaht gesetzt, sodass die Positionierung der einzelnen Bauteile während des Vorwärmens und beim Schweißen der Baugruppe bestehen bleibt [48]. Dieser Vorgang wird in der Fachliteratur als Heften bezeichnet [41, 48]. Nach dem Heften der ersten Schweißnaht erfolgt ein erneutes Ausrichten, Justieren und Positionieren der Schweißkonstruktion, bevor das Heften aller weiteren Schweißnähte erfolgt. Die Abbildung 45 kennzeichnet die erforderlichen Heftstellen an den jeweiligen Schweißnähten (siehe Tabelle c im Anhang).

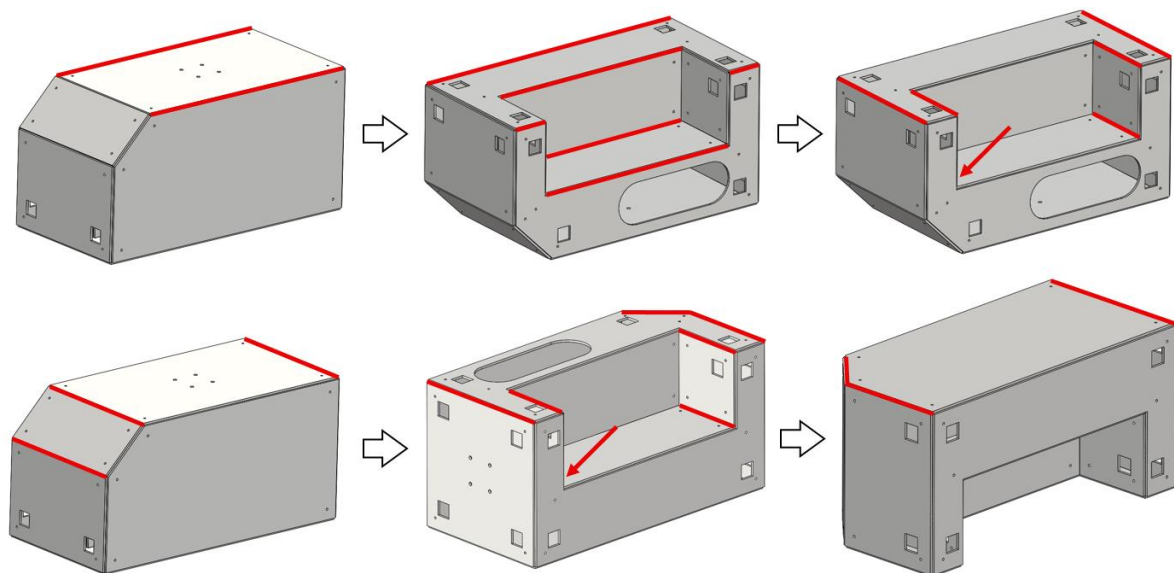


**Abbildung 45 Heften der Schweißkonstruktion für die jeweilige Schweißnaht**

Zur Einhaltung der geforderten Qualität findet nach dem Heften der Baugruppe eine Überprüfung der Toleranzen statt. Im Falle von unzulässigen Abweichungen erfolgt direkt in der Montagestation die Nacharbeit der Schweißkonstruktion. Entspricht die Schweißkonstruktion den Anforderungen, wird gemäß der Montageaufgabe die Baugruppe weiter geheftet. Je nach Material der Baugruppe müssen die Schweißnähte in einem zusätzlichen Arbeitsschritt mittels Industrieklebeband abgedichtet werden, um das Einleiten von passivem Prozessgas für das Schweißen zu ermöglichen. Alle Arbeitsschritte werden auf Papierprotokollen aufgezeichnet und

in Form eines Laufzettels der Schweißkonstruktion beigelegt. Kommt es innerhalb der Vormontage zu Änderungen am Produkt, werden diese dokumentiert und der Endmontage zur Verfügung gestellt.

In der Endmontage werden die Schweißnähte an der Schweißkonstruktion gesetzt. Der Schweißfacharbeiter richtet die Montagestation nach der Schweißvorschrift (WPS) ein. Die Schweißparameter werden, wie in der Vormontage, manuell am Schweißgerät eingestellt. Die Reihenfolge der zu schweißenden Nähte liegt dem Facharbeiter in der Projektdokumentation als WPS vor. Das Ermitteln der Vorzugslage und das damit verbundene Ausrichten und Positionieren der Baugruppe erfolgt durch den Facharbeiter. Für das manuelle Schweißen der Baugruppe ist ein Einspannen nicht zwingend erforderlich. Prozessrelevante Abweichungen können während des Schweißens durch die geschulten Facharbeiter korrigiert werden. Beim Schweißen von Edelstahlkonstruktionen sind weitere Arbeitsinhalte erforderlich. Dazu gehören unter anderem das Evakuieren von Sauerstoff aus der Baugruppe durch das Einleiten von passiven Prozessgasen sowie das Entfernen des Industrieklebebands an der jeweiligen Schweißnaht. Nach jeder gesetzten Naht findet eine Inspektion der Schweißung durch den Facharbeiter mittels optischer Begutachtung statt. Jeder Schweißprozess wird für die Zertifizierung der Schweißkonstruktion dokumentiert. Nach einer kurzen Abkühlzeit der Schweißnaht wird die Baugruppe erneut in einer weiteren Vorzugslage entsprechend der Schweißvorschrift positioniert (Abbildung 46) (siehe Tabelle d im Anhang).



**Abbildung 46 Ermitteln der Vorzugslage exemplarisch für die jeweilige Schweißnaht am Beispiel des Schweißbehälters**

Kleine Änderungen an der Schweißkonstruktion werden direkt im Prozessablauf auf dem betrieblichen Hallenboden, unter Rücksprache mit dem Schweißfachingenieur,

durch den Facharbeiter angepasst und für eine erneute Produktion der Schweißkonstruktion dokumentiert.

Nach dem erfolgreichen Setzen aller Schweißnähte wird die Baugruppe gereinigt und nach dem geforderten Qualitätsstandard geprüft. Für zertifizierte Schweißkonstruktionen mit einem hohen Qualitätsstandard ist eine zerstörungsfreie Prüfung, z.B. Ultraschallprüfung, jeder einzelnen Schweißnaht bzw. Schweißverbindung erforderlich. Erfüllt die Schweißkonstruktion die geforderten Produktmerkmale, wird diese Baugruppe für die Auslieferung an den Kunden vorbereitet.

Im folgenden Kapitel 3.2 erfolgt die Konzeption der fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter.

### **3.2 Fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter**

Die Montage von hochwertigen Schweißkonstruktionen erfordert eine hohe Anzahl an Montageoperationen, die für jede neue Schweißkonstruktion individuell angepasst werden. Neben der Auswahl von Schweißreihenfolgen und deren Prozessparameter, kurz WPS, ist in der Prozessplanung eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes eine sinnvolle Aufteilung der Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter erforderlich.

Um eine möglichst hohe Effizienz am Schweißarbeitsplatz zu erzielen, muss die Aufgabenteilung auf das Arbeitsvermögen des Schweißfacharbeiters abgestimmt werden. Dabei ist vor allem auf eine richtige Auslastung der Facharbeiter, in Kombination mit deren Qualifikation, zu achten. Eine falsche Aufteilung der Arbeitsinhalte, welche zur Überlastung oder Unterlastung in einer manuellen Tätigkeit führt, mindert die Konzentration und Aufmerksamkeit der Facharbeiter.

Mit dem Ansatz der fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter wird das Arbeitsvermögen der Schweißfacharbeiter optimal mit den Eigenschaften eines Robotersystems kombiniert, sodass eine hohe Effizienz in der manuellen Tätigkeit erzielt werden kann und somit die Produktivität des Schweißarbeitsplatzes im Vergleich zu bisherigen Systemlösungen gesteigert wird.

Die in der Literatur bisher beschriebenen Lösungsansätze einer sinnvollen Aufteilung der Montageoperationen beziehen sich auf Bewertungsverfahren der allgemeinen Fähigkeiten von Mensch und Roboter. Dabei gibt es verschiedene Planungsansätze, die sich durch eine Erweiterung des Montageplanungsvorgehens nach Bullinger [95] auszeichnen. Alternativ werden bislang Bewertungsansätze verfolgt, welche die Automatisierbarkeit von den betrachteten Prozessen hinsichtlich der technischen Umsetzung und einer wirtschaftlichen Automatisierung bewertet. Laut Spillner [2] zeichnet sich ein konkretes Bewertungsverfahren nach Ross [96] durch die hohe Anzahl an Kriterien mit quantitativen Ausgangsdaten aus und setzt kein Erfahrungswissen voraus [2].

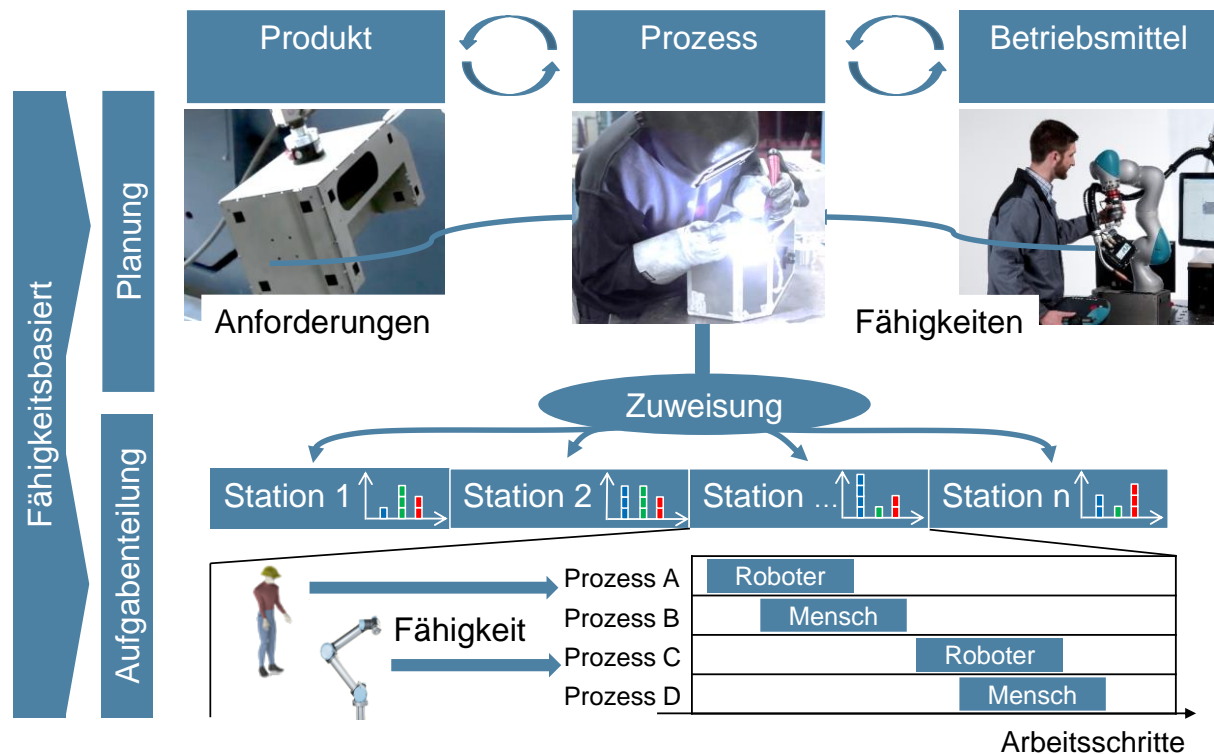
Diese bisherigen Ansätze für die Aufteilung zwischen Mensch und Roboter in der Montage eignen sich nicht für die Gestaltung eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes für die Fertigung von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen, da die Aufteilung der Arbeitsinhalte in der Montage von zertifizierten Schweißkonstruktionen viel Prozessverständnis für die Planung erfordert, was auf einer langjährigen Erfahrung des Schweißfachingenieurs beruht. Entscheidungen zwischen manuellen und automatisierten Arbeitsinhalten müssen innerhalb der Produktentwicklung, je nach Anforderungen des Prozesses, individuell an jede Schweißkonstruktion angepasst werden. Die Aufteilung muss in bestehende Prozessabläufe bei der Erstellung der Schweißvorschrift integriert werden, ohne die Verwendung von zusätzlicher Planungssoftware, um eine effiziente und einfache Aufteilung der Arbeitsinhalte zu gewährleisten.

### **Dynamische Aufgabenteilung in der Montage von Schweißkonstruktionen**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist eine Planungsmethode für die dynamische Aufgabenteilung entstanden. Ausgangspunkt für die Erstellung der Aufgabenteilung ist immer die fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung zwischen manuellen und automatisierten Montageprozessen. Daher wird der Montageprozess entsprechend der Produkthanforderungen abgeleitet und die jeweiligen Fähigkeiten bedarfsgerecht zwischen Mensch und Roboter aufgeteilt. Eine unidirektionale Vorgehensweise führt häufig nicht zu einem betriebswirtschaftlich und technisch optimalen Ergebnis. Restriktionen aus dem Prozess oder den Betriebsmitteln müssen berücksichtigt werden, um die Arbeitsinhalte zur effizienten Montage von kundenspezifischen Produkten sicherzustellen, sodass daraus ein gesamtoptimales Ergebnis resultiert (Abbildung 47).

Im Folgenden wird eine Methode beschrieben, die die fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter unter Berücksichtigung der Einflüsse aus Produkt, Prozess und Betriebsmittel identifiziert. Dabei unterstützt die Methodik den Anwender bei der Auslegung von fähigkeitsbasierten Montageprozessen, welche nachfolgend in der Anwendung „Schweißen eines hochwertigen Schweißbehälters“ betrachtet werden.

Die Methodik lässt sich in drei Schritte untergliedern: Analyse der Arbeitsinhalte (vorgestellt in Kapitel 3.1.2 „Fokus operativer Produktentstehungsprozess einer Schweißkonstruktion“), Beschreibung der Fähigkeiten zwischen Mensch und Roboter (wird in Kapitel 3.2.1 beschrieben) sowie die Zuteilung der Aufgaben im Produktentstehungsprozess (wird in Kapitel 3.2.2 aufgezeigt).



**Abbildung 47 Planung einer fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter**

### 3.2.1 Beschreibung der Fähigkeiten zwischen Mensch und Roboter

Der Roboter zeichnet sich durch eine hohe reproduzierbare Prozessqualität aus, wohingegen beim Menschen die schwankende Aufmerksamkeit und weitere unkontrollierbare Faktoren zu einer instabilen Prozessqualität führen und hohe Kosten in der Nacharbeit verursachen. Demgegenüber liefern die Robotersysteme während der gesamten Prozessdauer eine konstante Leistung.

Ein wesentlicher Vorteil des Facharbeiters ist die Hand-Augen-Koordination, worin er einem Robotersystem überlegen ist. Unter Hand-Augen-Koordination versteht sich die herausragende motorische Fähigkeit, welche eine möglichst geringe Diskrepanz zwischen Bewegungsausführung und Bewegungsbeobachtung beinhaltet und wodurch auf Prozessabweichungen innerhalb einer Montageoperation reagiert werden kann [97]. Dem gegenüber muss ein Robotersystem mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet werden, um auf nicht vorhersehbare Prozesseinflüsse reagieren zu können. Der Einsatz solcher Sensoren ist jedoch meist mit einem hohen Kostenaufwand hinsichtlich der Anschaffungs- und Service-Kosten verbunden.

Ein weiterer Vorteil ist, dass der Mensch im Produktionsumfeld einen sehr großen Arbeitsraum abdecken kann und somit eine Mobilität mitbringt, die durch ein Robotersystem nicht verfügbar ist. Der Roboter befindet sich meist in einem statischen Arbeitsraum und kann nur unter bestimmten Randbedingungen seinen Arbeitsraum erweitern.

Obwohl sich zeigt, dass der Facharbeiter in der Produktion sehr anpassungsfähig ist, kann er nur mit einer begrenzten Genauigkeit geforderte Prozessparameter führen. Die begrenzte Genauigkeit des Facharbeiters hängt zusätzlich stark von der Körperstellung und dem Gewicht der zu handhabenden Betriebsmittel ab. Wohingegen ein Roboterarm unabhängig von seiner Pose innerhalb seines Arbeitsraums eine nahezu gleichbleibende Prozessleistung bereitstellt.

### **Fähigkeiten zwischen Mensch und Roboter im Schweißprozess bei der Montage von kundenspezifischen Baugruppen**

Der Schweißprozess in der Montage von kundenspezifischen Baugruppen erfordert eine große Anzahl an Fähigkeiten, um die hohen Qualitätsanforderungen effizient in der Montage abzubilden. Das Beispiel des Schweißbehälters (Kapitel 3.1.1) veranschaulicht die Vielzahl von Arbeitsinhalten vor und während der Endmontage von zertifizierten Schweißkonstruktionen. Dabei stellt der Facharbeiter in der Montage ein hohes Maß an Flexibilität dar. Gerade beim individuellen Einrichten des Arbeitsplatzes und beim Anpassen von Prozessabläufen sowie beim Handhaben der Baugruppen innerhalb des Wertschöpfungsprozesses ist der Facharbeiter einer automatisierten Schweißanlage überlegen.

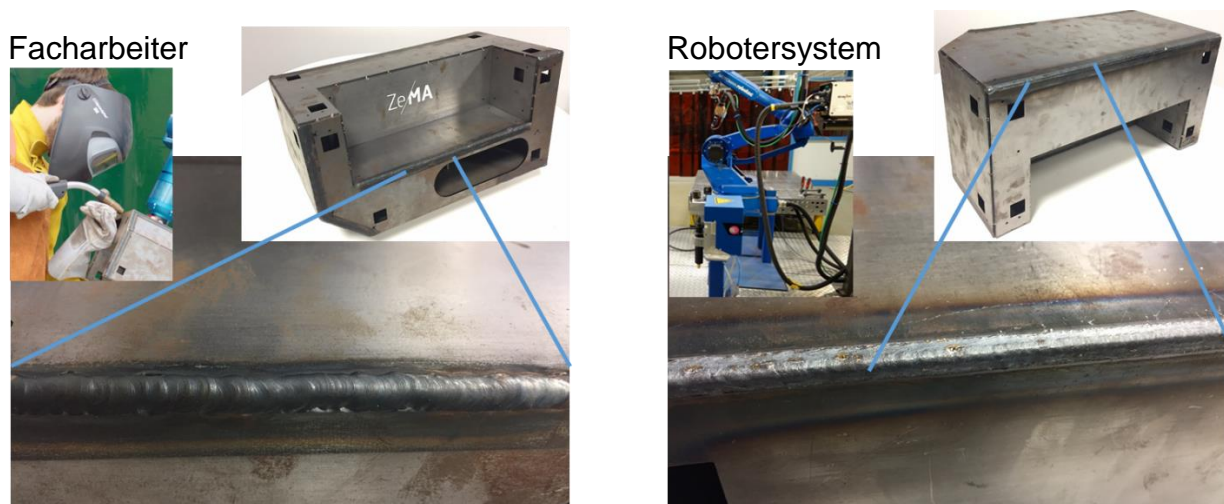
Bei vorhersehbaren Abweichungen während des Schweißprozesses sorgt der Facharbeiter stets für einen reibungslosen Prozessablauf, in sich ständig ändernden Arbeitsabläufen. Nicht alle Nähte bzw. Verbindungsnahten an einer Baugruppe können in einer optimalen Vorzugslage geschweißt werden. Ein enormer Vorteil des Schweißfacharbeiters ist das Setzen von schwer zugänglichen Schweißnähten, die ein geschicktes Führen des Schweißbrenners und viel Prozessverständnis erfordern. Neben flexiblen Bewegungsfähigkeiten kann der Experte visuelle Inspektionsaufgaben schnell und effizient erledigen. Das Setzen einer solchen komplexen Schweißnaht benötigt neben der akkuraten Werkzeugführung eine ständige Überwachung und Korrektur der Schweißparameter. Der Facharbeiter adaptiert seinen Bewegungsablauf, dank der hervorragenden Hand-Augen Koordination, an den Verlauf der Metallschmelze. Je nach Lage und Verlauf der Nähte sowie der Art einer Verbindungsstelle, passt der Experte individuell den Abstand zwischen Naht und Schmelzpunkt, die Geschwindigkeit des Brenners, das Überspringen des Brenners und die Orientierung der Brennerdüse an, um die geforderte Nahtqualität zu erzielen. Die Implementierung von komplexen Schweißnahtverläufen, welche innerhalb von kürzester Zeit und ohne Versuchsreihen entstehen, ist mit einer automatisierten Schweißanlage nicht möglich. Zudem erfordert die Applikation einer komplexen Schweißung zusätzlich entwickelte An- und Abrückbewegungen, die eine kollisionsfreie Bahn innerhalb des Arbeitsraums eines Roboters voraussetzen.

Eine automatisierte Schweißanlage ist für Schweißnähte geeignet, die einen hohen Arbeitsinhalt erfordern, wie beispielsweise das Setzen von einer langen Schweißnaht, welche ein mehrfaches Einfädeln des Facharbeiters erfordern würde. Neben einer schnelleren Vorschubgeschwindigkeit profitiert die automatisierte Schweißanlage



durch das Schweißen mit konstanten Prozessparametern beim Setzen der Langnähte. Die geringe Abweichung hinsichtlich des Abstands und der Geschwindigkeit des Prozesswerkzeugs unter einer geregelten Energiezuführung führt zu einer signifikanten Steigerung der konstanten Einbrandtiefe und stellt somit die gewünschte Qualität der langen Schweißnaht sicher.

Die Abbildung 48 veranschaulicht die Ergebnisse eines Facharbeiters und einer roboterbasierten Schweißanlage beim Setzen von langen Schweißnähten. Auf der linken Seite ist die Schweißnaht eines Facharbeiters dargestellt. Erkennbar ist ein nicht homogener Schmelzverlauf, ein teils unvollständiges benetzen der Verbindungsnaht und eine unregelmäßige Einbrandtiefe der Naht. Dagegen überzeugt die automatisierte Schweißnaht auf der rechten Seite durch einen homogenen Schmelzverlauf sowie einer gleichmäßigen Einbrandtiefe der Naht.



**Abbildung 48 Vergleich zwischen Mensch und Roboter beim Setzen von langen Schweißnähten**

Ein weiterer Vorteil der automatisierten Schweißnaht stellt das Aufrufen von Prozessparametern aus vorgefertigten Datensätzen und das Speichern von Prozessverläufen dar. Sind die Schweißparameter in der Schweißanlage hinterlegt, so können diese jederzeit automatisiert eingespielt werden. Während des Setzens der Schweißnaht werden alle prozessrelevanten Parameter überprüft bzw. gemessen und in einem Protokoll abgespeichert. Dies ermöglicht ein schnelles und einfaches Dokumentieren von Schweißnähten für die Zertifizierung von Schweißkonstruktionen mit einem hohen Qualitätsstandard.

### **3.2.2 Zuteilung der Aufgaben im Produktentstehungsprozess**

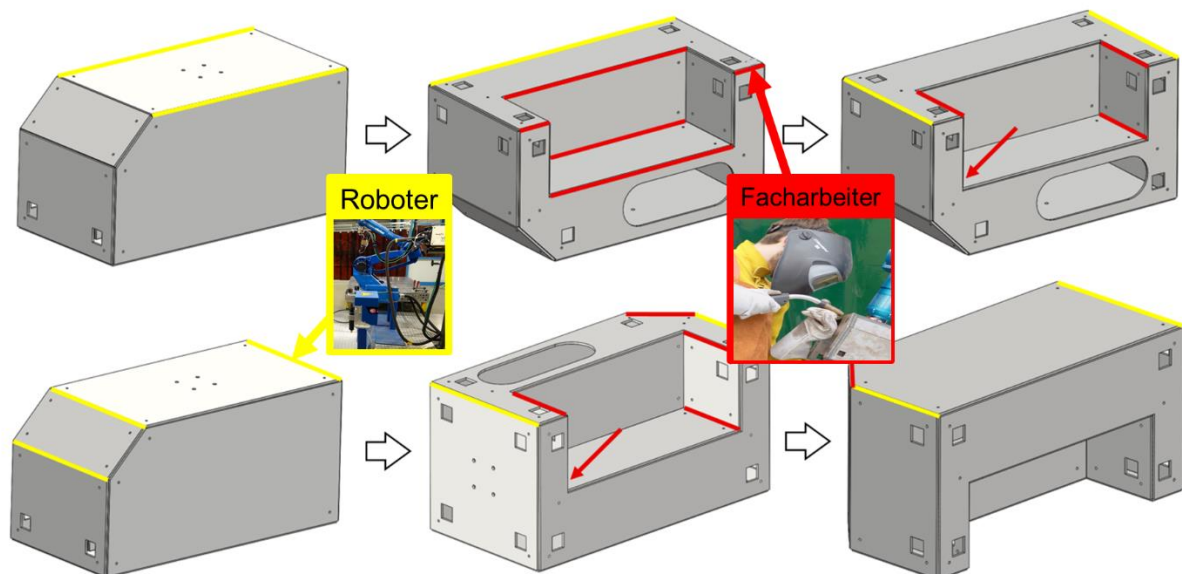
Basierend auf den Fähigkeiten innerhalb der Montage einer Schweißkonstruktion einer kundenspezifischen Baugruppe erfolgt die Zuteilung der Aufgaben im Rahmen der Produktentwicklung durch den Schweißfachingenieur. Aufgrund der Vor- und Nachteile einer Schweißanlage als auch eines Facharbeiters findet die Festlegung der Arbeitsinhalte statt.

### Festlegung der Arbeitsinhalte:

Der Schweißfacharbeiter eignet sich für das Einrichten eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes innerhalb der Montage von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen. Das Setzen von schwer zugänglichen Schweißnähten mit komplexen Nahtverläufen übernimmt dank kognitiver Fähigkeiten der Facharbeiter. Das Setzen der Stoßverbindungen von Schweißnähten erfolgt meist außerhalb der Vorzugslage der Schweißnaht und kann nur durch den qualifizierten Schweißfacharbeiter effizient abgebildet werden. Für die Inspektion der Schweißnähte vor und nach dem Schweißprozess ist der geschulte Facharbeiter innerhalb der Schweißzelle qualifiziert.

Bei dem Setzen von langen Nahtverläufen wird der Facharbeiter durch ein robotergestütztes Führen des Prozesswerkzeugs und einer parameterüberwachten Schweißanlage unterstützt.

Je nach Schweißkonstruktion legt der Schweißfachingenieur die Aufgabenteilung aus. Am Beispiel des Schweißbehälters ist eine Aufgabenteilung in Abbildung 49 veranschaulicht. Die gelb markierten Schweißnähte erfolgen durch den Einsatz eines Roboters und die rot markierten Schweißnähte setzt der Facharbeiter.



**Abbildung 49 Visualisierung der Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter an der Schweißkonstruktion**

### 3.3 Auslegung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes

Die Auslegung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes benötigt ein übergreifendes Steuerungskonzept, welches den Anforderungen, aus Kapitel 2.3 und 2.4, entspricht. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist eine Methodik zur Auslegung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes entstanden, die anhand eines teilautomatisierten



Schweißarbeitsplatzes entwickelt wurde. Die Methode wird, neben der Auslegung eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes, auch in vielen weiteren teilautomatisierten Systemlösungen eingesetzt. Dazu gehören beispielsweise Anwendungen in der Luftfahrtbranche oder in der Montage von Elektronikkomponenten [98].

Die Abbildung 50 veranschaulicht die vorliegende Methodik, welche die Entwicklung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes erheblich vereinfacht. Dafür wird die Entwicklung in sieben zentrale Themenfelder zerlegt.



Abbildung 50 Auslegung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes

Unter der **Arbeitsplatzgestaltung** versteht sich die Auslegung des teilautomatisierten Arbeitsplatzes hinsichtlich der Anordnung der Betriebsmittel und deren Integration im Produktionsumfeld, als auch die Art der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter. Ein wesentlicher Bestandteil in der Zusammenarbeit ist die Aufgabenteilung der Montageprozesse in manuelle und automatisierte Montageaufgaben (in Kapitel 3.2.1) sowie die sichere Arbeitsplatzgestaltung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes.

Für die Auswahl einer geeigneten Kinematik für den teilautomatisierten Arbeitsplatz erfolgt die Auswahl eines **Handhabungsgeräts**. Dabei wird eine kinematische Struktur ausgewählt und deren Restriktionen in Form einer Arbeitsraumanalyse und einer dynamischen Modellierung überprüft.

Das **Steuerungskonzept** dient einem modularen Systemansatz und stellt den Datenaustausch zwischen den mechatronischen Modulen in der Produktion sicher.

Neben der Erweiterung von bestehenden Plattformen der Steuerungstechnik, wie beispielsweise einer Robotersteuerung, ermöglicht das Steuerungskonzept des teilautomatisierten Montagesystems die Anbindung an ein Betriebsleitsystem (MES) und falls erforderlich die Anbindung an ein Unternehmensleitsystem (ERP). Dies führt zu schnellen Reaktionszeiten innerhalb der Produktionsprozesse.

Jedes teilautomatisierte Montagesystem im produktiven Einsatz in der Europäischen Union benötigt ein **Sicherheitskonzept** mit einer abschließenden Zertifizierung (CE-Kennzeichnung), die den Richtlinien der Europäischen Gemeinschaft entspricht. Die Entwicklung des Sicherheitskonzepts wird anhand der Arbeitsplatzgestaltung abgeleitet und ist immer für die gesamte Anwendung des teilautomatisierten Montagesystems zu betrachten. Dabei unterstützen Normen und Richtlinien bei der Erstellung der geforderten Risikobeurteilung.

Die einfache Bedienung eines Montagesystems, die sich an den Bedürfnissen der Montagearbeiter orientiert, beinhaltet die Konzeption eines bedarfsgerechten **Bedienkonzeptes** (in Kapitel 4.1). Im angepassten Bedienkonzept behält der Mitarbeiter zu jeder Zeit die Kontrolle über das Montagesystem. Zusätzliches Prozesswissen oder Erfahrungen der Facharbeiter können während des produktiven Betriebs im Montagesystem implementiert werden. Bedient wird dabei nicht nur der Roboter, sondern der komplette Montagearbeitsplatz. Anpassungen von Prozessabläufen oder Roboterbahnen erfolgen intuitiv im Montageablauf und erfordern nur geringe bis keine Programmierkenntnisse.

Für eine schnelle Identifikation der Bezugskoordinatensysteme des Montagesystems und für eine Kompensation von Abweichungen der Toleranzen am Produkt ist die Entwicklung eines anforderungsgerechten **Messkonzepts** (in Kapitel 4.2) erforderlich. Die Auslegung des Messkonzepts basiert auf der Optimierung der Toleranzkette durch Verringerung der relevanten Abweichungen im Montagesystem. Aus allen erforderlichen Abweichungen des Montagesystems, welche aus einzelnen Gliedern bestehen, wird zunächst eine Toleranzkette [99] gebildet. Anhand quantifizierbarer Merkmale am Produkt erfolgt anschließend die Reduktion der Glieder innerhalb der Toleranzkette.

Individuell zu jeder Anwendung ist ein passendes **Prozesswerkzeug** zu entwickeln. Die Finalisierung des automatisierten Prozesswerkzeugs ist einer der letzten Schritte während der Konzeption eines teilautomatisierten Montagesystems. Neben der zentralen Aufgabe, ein robustes, prozessfähiges Werkzeug zu entwickeln, müssen die Einflussfaktoren bezüglich Sicherheitskonzept und Messkonzept berücksichtigt werden. Generell ist bei dem Design des Prozesswerkzeugs auf eine möglichst kleine und schlanke Auslegung zu achten, damit eine gute Zugänglichkeit der Prozessstelle ermöglicht wird und ein möglichst großer Arbeitsraum des Robotersystems sichergestellt werden kann. Gerade in Anwendungsfeldern mit rauem Betriebsumfeld, beispielsweise einer Schweißung, ist auf ein hohes Standhalten des Werkzeugs zu achten, um eine hohe Verfügbarkeit des Montagesystems zu gewährleisten.

### **3.3.1 Aufgabenteilung in einem teilautomatisierten Arbeitsplatz**

Die Aufgabenteilung ist ein Bestandteil der Arbeitsplatzgestaltung und besteht aus einem Wechselspiel von automatisierten und manuellen Montageprozessen.

Ein wesentlicher Bestandteil der Aufgabenteilung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes resultiert aus der Planung der Montageaufgaben. Für die Planung der Montageaufgaben ist ein iterativer Ablauf der Arbeitsplatzgestaltung gefordert, welcher sich von bisherigen Planungsmethoden aus der Montage nicht unterscheidet. Die Festlegung der geforderten Montageaufgaben innerhalb eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes geht aus einer groben Planung der gesamten Montagelinie hervor.

Entscheidend für eine effiziente Aufgabenteilung ist die Unterteilung der einzelnen Montageaufgaben in kleine Prozessschritte. Die Basis bildet die Szenarien-Analyse, die sich in die Analyse von Produkt, Prozess und Betriebsmittel unterteilt (vorgestellt in Kapitel 2.3 und im vorliegenden Kapitel 3), sowie auf der fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung in der Montage (dargestellt in Kapitel 3.2). Aus der Betrachtung der Montageaufgaben ergeben sich die jeweiligen Arbeitsräume zwischen Mensch und Roboter.

Mittels der genauen Beschreibung der wertschöpfenden Tätigkeiten hinsichtlich Arbeitsraum und Zeit findet die Zuweisung der jeweiligen Arten einer Zusammenarbeit statt. Ein effizienter teilautomatisierter Montagearbeitsplatz ermöglicht die Aufteilung von Montageaufgaben zwischen Mensch und Roboter und ist optimal an deren Prozessabläufe angepasst.

Die Vorteile der Aufgabenteilung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes können am Beispiel eines Sondermaschinenbaues aufgezeigt werden. Im Anwendungsbeispiel der Montage einer kundenspezifischen Schweißkonstruktion für die Medizintechnik werden die Arbeitsschritte, wie beispielsweise das Vermessen des Bezugskoordinatensystems (vorgestellt in Kapitel 4.2) durch das Robotersystem und die Prüfung der Einhaltung der Prozessfähigkeit sowie das Einrichten des Schweißarbeitsplatzes durch den Schweißfacharbeiter, aufgeteilt.

Die Aufteilung der Arbeitsschritte erfolgt über eine Zuordnung der Montageoperationen zwischen Mensch und Roboter. Montageabläufe, die bislang sequenziell erfolgten, können zur gleichen Zeit von Mensch und Roboter bearbeitet werden. Für die Optimierung der Arbeitsplatzgestaltung ist nicht zwingend eine Mensch-Roboter-Kooperation erforderlich. Im Anwendungsfall der teilautomatisierten Montage von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen ist jedoch der überschneidende Arbeitsraum zwischen Mensch und Roboter vorteilhaft. Der überschneidende Arbeitsraum erleichtert die Prozessführung der automatisierten Schweißprozesse, in dem das Robotersystem beispielsweise simultan mittels Testfahrt dem Facharbeiter den Bewegungsablauf beim Setzen der Schweißnaht veranschaulicht.

Die Abbildung 51 zeigt exemplarisch die Aufteilung von Arbeitsschritten eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes innerhalb einer Arbeitsplatzgestaltung,

basierend auf Kapitel 3.2 „Fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter“.

Die Ausgangssituation „vor der Arbeitsplatzgestaltung“ ist eine sequenzielle Montage einer automatisierten Schweißnaht, die durch eine Teilautomatisierung die Arbeitsschritte für den Schweißfacharbeiter und die Arbeitsschritte für das Robotersystem beinhalten. Die manuellen Arbeitsschritte sind z.B. die Kontrolle der Schweißnaht, das Positionieren der Schweißkonstruktion, das Einleiten von Prozessgasen, die Überwachung der Prozessfähigkeit eines automatisierten Schweißens und die Kontrolle der automatisierten Messfahrt. Die Arbeitsschritte des Roboters sind das Vermessen der Schweißnaht und das Setzen einer langen Schweißnaht.

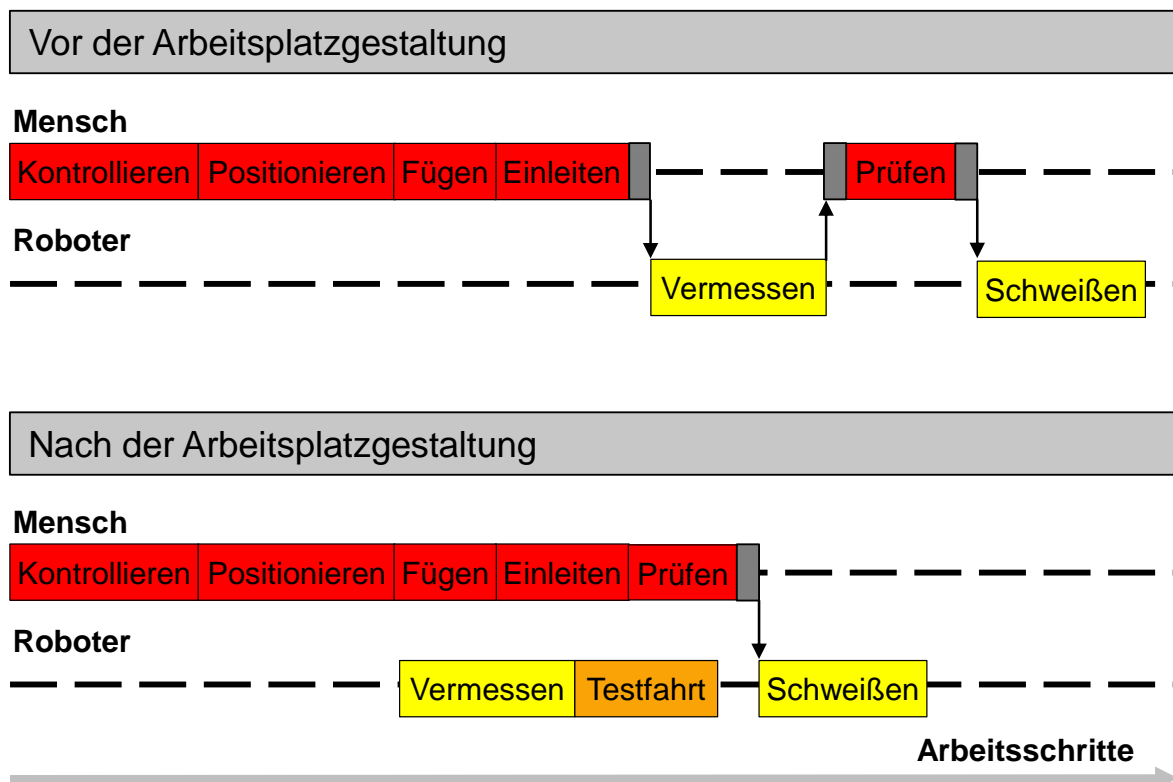


Abbildung 51 Aufteilung von Arbeitsschritten innerhalb einer Arbeitsplatzgestaltung

Durch die angepasste Aufteilung der Arbeitsschritte in einem teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz, unter der Berücksichtigung einer sicheren Arbeitsplatzgestaltung, kann „nach der Arbeitsplatzgestaltung“ die Montage der kundenspezifischen Schweißkonstruktion in einer kooperierenden Arbeitsform erfolgen. Trotz einer reduzierten Geschwindigkeit des Robotersystems (sicherheitsbedingt) während des Vermessens der Schweißnaht ist die Prozesszeit, gegenüber der sequenziellen Montage, für das Setzen einer automatisierten Schweißnaht durch die Aufteilung der Arbeitsschritte zwischen Mensch und Roboter gesunken. Wesentlich entscheidender als das Senken der Prozesszeiten im

Sondermaschinenbau ist die Kontrolle des automatisierten Schweißprozesses in unmittelbarer Nähe der Schweißnaht durch den Facharbeiter. Das Setzen der automatisierten Schweißnaht erfordert basierend auf der Risikobeurteilung eine sichere Kapselung des Prozesses gegenüber dem Schweißfacharbeiter, beschrieben in Kapitel 5.1.

### **3.3.2 Sichere Arbeitsplatzgestaltung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes**

Eine große Herausforderung stellt die sichere Arbeitsplatzgestaltung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes dar. Dank der Entwicklung von neuen Sicherheitseinrichtungen und Sicherheitsfunktionen ist die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter ohne trennende Schutzeinrichtung möglich. Durch die Überwachung von Arbeitsräumen zur Vermeidung von Kollisionen mit dem Bediener oder der Einhaltung von Druck- und Kraftgrenzen ergeben sich neue Formen einer effizienten Arbeitsplatzgestaltung in der Montage.

Für den Einsatz des teilautomatisierten Arbeitsplatzes im Produktionsbetrieb ist die CE-Kennzeichnung der Maschine erforderlich und unterliegt damit den Anforderungen der europäischen Richtlinien. Dazu gehört unter anderem die Maschinenrichtlinie [100], die Niederspannungsrichtlinie [101] und die Richtlinie für die elektromagnetische Verträglichkeit von elektrisch betriebenen Geräten (EMV) [102]. Zur Unterstützung der Interpretation dieser Normen wird durch das Europäische Komitee eine Liste harmonisierter Normen veröffentlicht, die eine Auslegung der technischen Aspekte vereinfacht.

Nach der Maschinenrichtlinie muss für alle Maschinenanwendungen eine Risikobeurteilung durchgeführt werden. Ohne Risikobeurteilung kann kein teilautomatisiertes Montagesystem im Produktionsumfeld eingesetzt werden. In der Risikobeurteilung werden alle Gefährdungen gegenüber Montagemitarbeitern mithilfe eines Risikografen identifiziert und bewertet. Durch die Erstellung des Risikobewertungsprozess nach DIN EN 12100 [61] sollen die Risiken einer Gefährdung weitestgehend reduziert und/oder eliminiert werden.

Risikominderungen an einzelnen Teilen garantieren keine Risikominderung für das Gesamtsystem. Die Überprüfung der Gefährdungsbeurteilung wird daher als Gesamtvalidierung angesehen. Für die Gesamtvalidierung werden alle konstruktiven, technischen und organisatorischen Maßnahmen überprüft. Verschiedene Validierungsverfahren sind aus der Norm für Industrieroboter der DIN EN ISO 120218-2 [65] und aus der „Technische Regel DIN ISO/TS 15066“ [69] zu entnehmen.

Im folgenden Kapitel wird ein Leitfaden für die sichere Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter erarbeitet. Die Vorgehensweise für eine sichere Arbeitsplatzgestaltung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes erfolgt am Anwendungsbeispiel einer kundenspezifischen Schweißkonstruktion.

## Vorgehensweise zur CE-Kennzeichnung eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes

Die Vorgehensweise zur CE-Kennzeichnung eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes wurde mit dem Projektpartner Pilz GmbH in Spanien im EU-Projekt FourByThree konzipiert.

Prinzipiell unterscheidet sich die Vorgehensweise zur CE-Kennzeichnung eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes nicht von der CE-Kennzeichnung eines teilautomatisierten Montagesystems. Daher erfolgt die Beschreibung der Vorgehensweise allgemein für die Kennzeichnung eines teilautomatisierten Montagesystems.

Mit dem CE-Zeichen dokumentiert ein Hersteller, dass er alle für sein Produkt relevanten europäischen Binnenmarktrichtlinien berücksichtigt und alle geeigneten Konformitätsbewertungsverfahren angewendet hat.

Der Prozess der CE-Kennzeichnung ist in 8 Schritte unterteilt, siehe Abbildung 52.

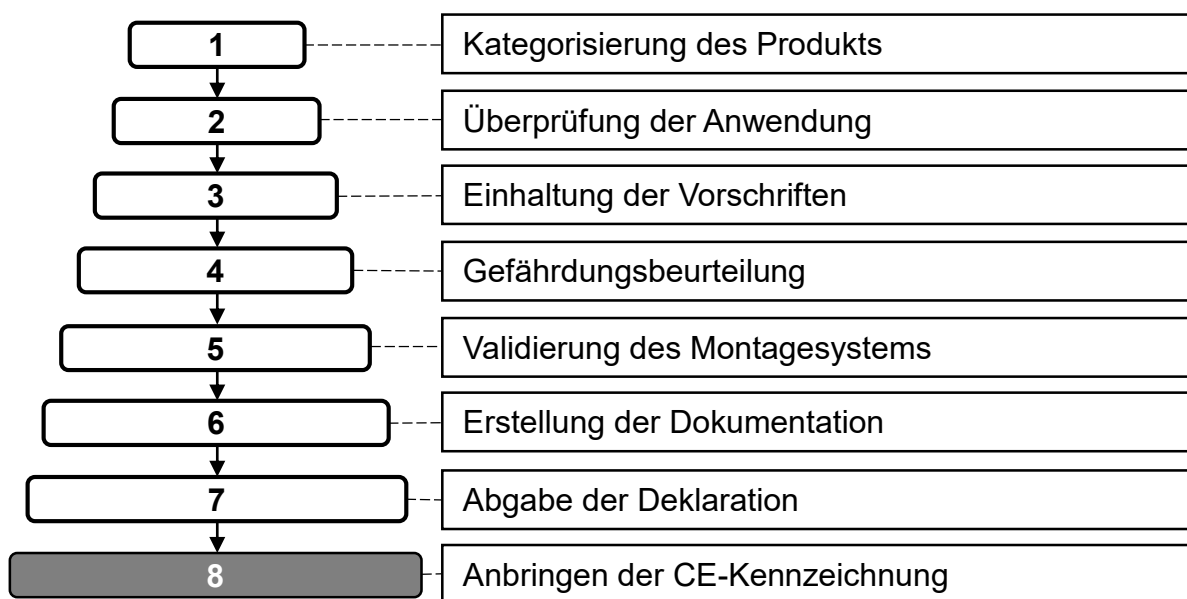


Abbildung 52 Vorgehensweise einer CE-Kennzeichnung

### 1. Schritt: Kategorisierung des Produkts

Zu Beginn der CE-Kennzeichnung findet die Kategorisierung aller eingesetzten Betriebsmittel im Montagesystem statt. Dabei werden in der Regel alle Betriebsmittel einzeln als „unvollständige Maschine“ nach den Richtlinien bezeichnet und benötigen eine Einbauerklärung. Kommt es im teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz zum Einsatz eines Industrieroboters und eines programmierbaren Schweißgeräts, so können diese alleine keine spezifische Anwendung ausführen und benötigen eine Einbauerklärung gemäß Anhang 2 b der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG.

Liegt jedoch seitens des Herstellers keine Einbauerklärung über die Baugruppe vor, muss für diese eine EG-Baumusterprüfbescheinigung ausgestellt werden. Diese Bescheinigung bestätigt, dass die Baugruppe den Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen des Anhangs 1 der Maschinenrichtlinie entspricht, um die geforderte EG-Konformitätserklärung des Montagesystems zu erhalten.

## **2. Schritt: Überprüfung der Anwendung auf zusätzliche Richtlinien**

Je nach Anwendung muss das Montagesystem auf die Verwendung von anderen EU-Richtlinien überprüft werden, die verschiedene Aspekte abdecken können, die jedoch für die CE-Kennzeichnung eines Montagesystems zwingend erforderlich sind. Dazu zählen alle Betriebsmittel, die innerhalb der Montageanwendung erforderlich sind, wie beispielsweise Maschinen, Apparate, Werkzeuge oder Anlagen, die bei der Montage verwendet werden. Jedoch sind die meisten grundlegenden Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen in der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG bereits enthalten.

## **3. Schritt: Einhalten der Sicherheitsvorschriften**

Da die Formulierung der grundlegenden Gesundheits- und Sicherheitsanforderungen gemäß Anhang 1 der Maschinenrichtlinie sehr abstrakt gehalten sind, ist das Einhalten der Sicherheitsvorschriften sicherzustellen. Dazu veröffentlicht die Europäische Union eine Liste mit Richtlinien und den dazugehörigen harmonisierten Normen, worin Standards für eine Konformität mit deren Vorschriften dargestellt sind. Dadurch wird der Nachweis der jeweiligen Sicherheitsvorschriften innerhalb der Risikobewertung erheblich vereinfacht. Ein Industrieroboter kann die Maschinenrichtlinien gemäß Anhang 1 nicht vollständig erfüllen, da das Einsatzfeld eines Roboters im teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz viele Risiken birgt. Der Hersteller muss in der Einbauerklärung explizit alle wesentlichen Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen, die der Roboter erfüllt, dokumentieren.

## **4. Schritt: Durchführung der Gefährdungsbeurteilung**

Der Integrator des Montagesystems ist verpflichtet, eine Risikobeurteilung durchzuführen, um alle mit seiner Maschine verbundenen Gefahren zu ermitteln.

Das Resultat dieser Bewertung muss bei der Konstruktion und Arbeitsplatzgestaltung der Maschine berücksichtigt werden. Inhalt und Umfang einer Gefährdungsanalyse sind in keiner Richtlinie festgelegt, aber die EN ISO 12100 beschreibt das allgemeine Vorgehen. So kann beispielsweise die Gefährdung des Facharbeiters im teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz während des Setzens einer automatisierten Schweißnaht nicht minimiert bzw. ausgeschlossen werden. Dies erfordert wegen der Gefährdung durch den automatisch zündenden Lichtbogen und des unkontrollierten Sprühens der Metallschmelze eine Kapselung des automatisierten Schweißprozesses. Für das Einrichten des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes und während des Vermessens der Schweißkonstruktion kann das Risiko einer Gefährdung des Facharbeiters weitestgehend durch individuelle Sicherheitsprinzipien eliminiert werden.

Alle relevanten Gefährdungen sind entsprechend des Verwendungszweckes, unter

Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus nach dem Inverkehrbringen der Maschine, zu identifizieren. Berücksichtigt werden auch die verschiedenen Gruppen, die mit der Maschine in Berührung kommen, wie Bedienungs-, Reinigungs- oder Wartungspersonal. Das Risiko wird für jede Gefahr bewertet.

Die risikoreduzierenden Maßnahmen werden nach dem Stand der Technik und unter Einhaltung der Standards festgelegt. Gleichzeitig wird das Restrisiko bewertet: Ist es zu hoch für eine nicht trennende Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, sind zusätzliche Maßnahmen erforderlich. Dieser iterative Prozess wird solange fortgesetzt, bis die erforderliche Sicherheit erreicht ist.

### **Schritt 5: Validierung des Montagesystems**

Trotz aller Sicherheitsvorkehrungen können nicht alle Kollisionen, gerade in teilautomatisierten Montagesystemen, ausgeschlossen werden. Kommt es jedoch zu einer Kollision mit dem Menschen, dürfen bestimmte Grenzwerte nicht überschritten werden, um die Sicherheit des Montagemitarbeiters zu gewährleisten. Die geforderten Grenzwerte im Kollisionsfall sind aus der Technischen Spezifikation ISO TS 15066 [69] für verschiedene Körperregionen zu entnehmen. Dabei werden zwei Arten der Kollision beschrieben – der quasi statische Kontakt und der transiente Kontakt [70]. Der statische Kontakt beschreibt eine Klemmung, in der kein Zurückschreiten möglich ist. Die gesamte kinetische Energie wird vom Körperteil aufgenommen. Im transienten Kontakt wird nur ein Teil der kinetischen Energie aufgenommen, da ein Rückzug möglich ist.

Der erfolgreiche Nachweis der Validierung verweist auf die Einhaltung der Sicherheitsvorschriften und ist ein wichtiger Schritt in der CE-Kennzeichnung.

Die Validierung eines teilautomatisierten Montagesystems beinhaltet die Überprüfung des Performance Level des Sicherheitskontrollteils, gemäß den Anforderungen der EN ISO 13849 [60, 103]. Für die Berechnung der Zuverlässigkeit des Montagesystems stehen Softwaretools am Markt zur Verfügung.

Kommt es zum Einsatz von nicht trennenden Schutzeinrichtungen, müssen diese den Anforderungen der EN ISO 13855 [104] entsprechen. Die Validierung der Schutzeinrichtungen erfordert die Berechnung der Sicherheitsabstände, im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen.

Im Falle einer kooperierenden Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, einer Mensch-Roboter-Kooperation, ist für die vollständige Konformität des Montagesystems eine Validierung der Leistungs- und Kraftüberwachung erforderlich. In der Vorschrift ISO TS 15066 sind alle dafür zulässigen Messverfahren für die Ermittlung der Kollisionsgrenzwerte aufgeführt.

### **Schritt 6: Erstellung der technischen Dokumentation und der Betriebsanleitung**

Nach der Validierung des kompletten Montagesystems erfolgt gemäß der Maschinenrichtlinie Anhang VII das Zusammenstellen aller technischen Unterlagen und technischen Dokumentationen.

Der Integrator des Montagesystems muss eine Einsicht der Dokumentation gegenüber den zuständigen nationalen Behörden über einen Zeitraum von zehn Jahren



gewährleisten können.

Die Erstellung der Betriebsanleitung, laut der Maschinenrichtlinie Anhang VI, muss in einer der Amtssprachen der EU und in der Sprache des Betreibers vom Integrator der Maschine verfasst und ausgehändigt werden.

### Schritt 7: Abgabe der Deklarationen

Die Abgabe der Deklarationen beschreibt die verbindliche Erklärung des Integrators der gesamten Montageanlage, dass er alle Richtlinien berücksichtigt hat und er erstellt dafür eine EG-Konformitätserklärung aus. Die Unterzeichnung der EG-Konformitätserklärung kann nur durch eine rechtskräftige Person oder dessen Vertreter erfolgen. Für das Einhalten der CE-Kennzeichnung haftet immer die rechtskräftige Person und gegebenenfalls die juristische Person des Unternehmens. Neben dem Unterzeichner der EG-Konformitätserklärung muss der Ersteller der technischen Dokumentation namentlich benannt werden und in der EU ansässig sein. Die konkreten Anforderungen für die Konformitätserklärung legt der Anhang II A der Maschinenrichtlinie fest.

### Schritt 8: Anbringen der CE-Kennzeichnung

Die CE-Kennzeichnung ist nach der Ausstellung der EG-Konformitätserklärung gut sichtbar auf dem Typenschild des gesamten Montagesystems anzubringen (Abbildung 53). Der Integrator muss dabei eine Verwechslungsgefahr mit anderen Kennzeichnungen vermeiden. Die ausführlichen Anforderungen der Anbringung und deren Inhalte einer CE-Kennzeichnung sind aus der Maschinenrichtlinie gemäß Anhang III zu entnehmen.

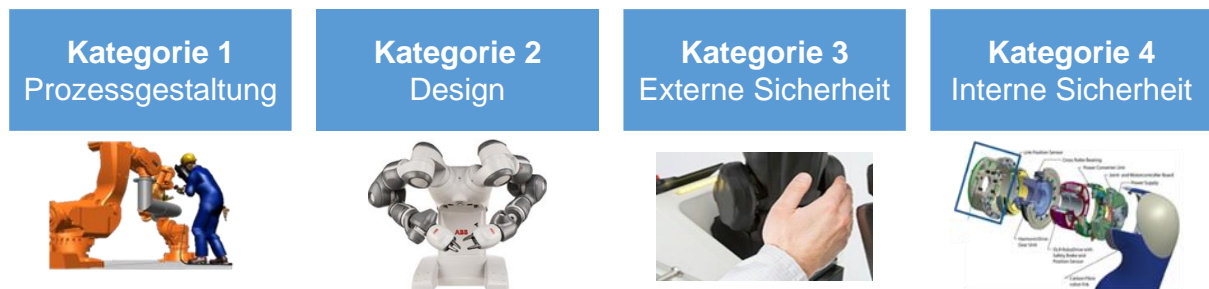


**Abbildung 53** Typenschild des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes mit CE-Kennzeichnung

### Sicherheitsprinzipien für die sichere Arbeitsplatzgestaltung eines teilautomatisierten Montagesystems

Die CE-Kennzeichnung sieht eine Risikobeurteilung des teilautomatisierten Montagesystems vor, in dem die Risiken einer Gefährdung bewertet und anschließend reduziert beziehungsweise eliminiert werden müssen. Gerade im Umgang mit

Arbeitsplätzen ohne trennende Schutteinrichtung stellt die Reduzierung und Eliminierung der Gefährdung bislang eine große Herausforderung dar. Im folgenden Kapitel werden Sicherheitsprinzipien in vier Kategorien unterteilt, in Abbildung 54 dargestellt, um den Prozessablauf der Risikobeurteilung zu vereinfachen. In der Regel erfolgt bei der Konzeption eines sicheren Arbeitsplatzes mit einer MRK die Kombination der verschiedenen Kategorien in unterschiedlichen Ausprägungsformen.



**Abbildung 54 Sicherheitsprinzipien für die sichere Arbeitsplatzgestaltung einer Mensch-Roboter-Kooperation [105 bis 108]**

Im ersten Schritt der Gefährdungsreduktion wird die sichere **Prozessgestaltung** der riskanten Montageaufgabe zwischen Mensch und Roboter angepasst. Die maximale Kollisionskraft muss reduziert werden. Dies erfolgt durch eine Begrenzung der maximalen Geschwindigkeit und/oder durch eine Begrenzung der bewegten Freiheitsgrade. Unter der Begrenzung der Freiheitsgrade wird z.B. das Limitieren von Achsbewegungen verstanden.

Kann die Prozessgestaltung die Einhaltung der Grenzwerte nach der Norm ISO/TS 15066 nicht gewährleisten, ist eine Optimierung des **Designs** an der kritischen Beurteilungsstelle notwendig. Die Zwischenräume des Handhabungssystems sind zu schließen. Quetschungen des menschlichen Fingers während der Bewegung sind zu vermeiden. Um die maximalen Kräfte und Drücke während einer Kollision so gering wie möglich zu halten, müssen die gefährdenden Kanten abgerundet sein sowie, falls erforderlich, durch weichere Materialien ersetzt werden. Eine weitere Optimierung des Designs hinsichtlich der Reduzierung von Kollisionskräften ist das Verringern der zu bewegenden Massen, eine Reduktion des Massenträgheitsmoments im Montagesystem und der Einsatz von nachgiebigen Elementen. Durch diese Optimierungen können die maximalen Kräfte und Drücke bei einer Kollision erheblich gesenkt werden.

Die dritte Kategorie ist die Integration von externen Sicherheitsprinzipien, um damit die Gefährdung der Montagemitarbeiter auszuschließen. **Externe Sicherheit** umfasst alle Sicherheitselemente, die über eine übergeordnete Sicherheitssteuerung eingebunden sind. Dazu gehören auch die zusätzlichen Schutteinrichtungen wie taktile Schutzabdeckungen oder optische Sensoriken. Alle sicherheitsrelevanten Sensoren müssen in der MRK im kooperierenden Betrieb einem Performance Level D der

sicheren Steuerungskategorie drei entsprechen.

Eine Möglichkeit der Integration von externer Sensorik ist der Einsatz kapazitiver Näherungssensoren. Durch eine Änderung des kapazitiven Felds können rechtzeitig Schutzmaßnahmen eingeleitet werden. Die Geschwindigkeit kann beispielsweise durch das sichere Stillsetzen oder durch die Anpassung der Roboterbahn reduziert werden, womit die Gefährdung durch eine Kollision minimiert wird.

Die höchste Form der Sicherheitskategorie ist der Einsatz von **internen Sicherheitsprinzipien**. Zu den internen Sicherheitsprinzipien gehört die interne Sensorik der Handhabungsgeräte. Diese beinhaltet die Überwachung von unerwarteten Kräften, die außerhalb eines zulässigen Grenzbereiches liegen, z.B. im Falle einer Kollision. Die unerwarteten Kräfte bzw. Momente werden im Vorfeld mittels einer Simulationsberechnung, in der Regel a priori, ermittelt. Basierend auf bekannten Kraftverläufen in der Bewegung, kann anhand von Motorströmen der Antriebe oder mit Drehmomentsensoren die unzulässige Kraft bestimmt werden. Ein Überschreiten der zulässigen Kräfte erfordert eine schnellstmögliche Stillsetzung des Montagesystems.



## **4 Steuerungskonzept zur intuitiven Prozessentwicklung und Prozessführung**

Ein zentraler Bestandteil der Auslegung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes, vorgestellt in Kapitel 3, ist die intuitive Prozessentwicklung und Prozessführung der manuellen und automatisierten Montageaufgaben.

In diesem Kapitel wird ein angepasstes Steuerungskonzept für die intuitive Prozessentwicklung und Prozessführung konzipiert, welches speziell auf die Bedürfnisse von produzierenden Unternehmen zugeschnitten ist und somit keine Roboterprogrammierkenntnisse erfordert.

Der Fokus richtet sich dabei auf das Bedienkonzept eines teilautomatisierten Montagesystems und das entsprechende Messkonzept für die Kompensation der resultierenden Prozessabweichungen.

Die Methodik für die Entwicklung eines Bedien- und Messkonzeptes für einen teilautomatisierten Arbeitsplatz wird ebenfalls am Anwendungsbeispiel einer kundenspezifischen Schweißkonstruktion im Sondermaschinenbau konzipiert.

### **4.1 Gestaltung des Bedienkonzeptes**

Im Folgenden wird die Konzeption des Bedienkonzeptes für die Prozessführung und Prozessentwicklung von Schweißprozessen bei der Herstellung von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen betrachtet.

Um eine ständige Kontrolle zu erzielen, benötigt der Montagemitarbeiter die notwendigen Informationen über die jeweiligen Montageprozesse direkt auf dem betrieblichen Hallenboden, damit er bei seiner wertschöpfenden Tätigkeit nicht beeinträchtigt wird.

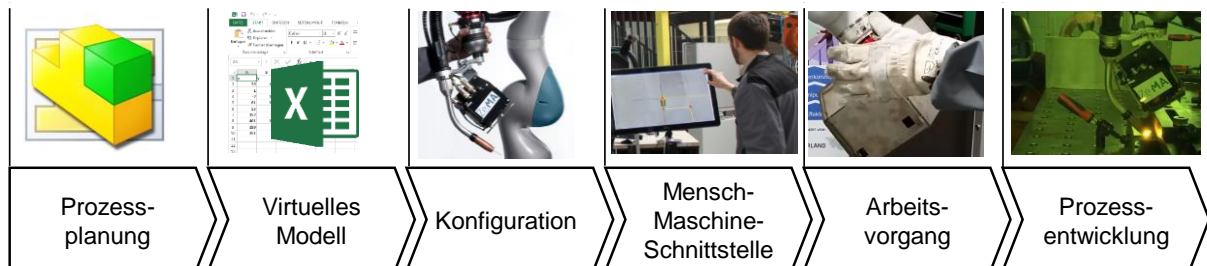
Neben der ständigen Kontrolle durch das System müssen über das Bedienkonzept die Erfahrungen und das Fachwissen der Schweißexperten einfließen können, um damit einen hoch effizienten Schweißarbeitsplatz über lange Sicht zu gewährleisten.

Für das Entwickeln und das Führen von Schweißprozessen müssen die Prozessparameter bei Bedarf direkt durch den Bediener über das Bedienkonzept angepasst werden können.

Die Gestaltung eines bedarfsgerechten Bedienkonzeptes muss immer an die jeweilige Anwendung innerhalb eines teilautomatisierten Montagesystems angepasst werden. Im Zuge der Gestaltung eines intuitiven Bedienkonzeptes wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Systematik entwickelt, welches die notwendige Flexibilität mitbringt, um die geforderten angepassten Bedienkonzepte schnell zu entwickeln und zu implementieren.

## Entwicklung eines angepassten Bedienkonzeptes

Zur Entwicklung eines angepassten Bedienkonzeptes sind in Abbildung 55 die zentralen Prozessschritte zur Erstellung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes beschrieben.



**Abbildung 55 Entwicklung eines angepassten Bedienkonzeptes**

In der **Prozessplanung** wird die zu montierende Baugruppe mit ihren jeweiligen Montageoperationen eingepflegt. Die produktrelevanten Merkmale für die Montage der Baugruppe, im konkreten Fall der Schweißkonstruktion, müssen erfasst werden. Dazu gehört die Organisation der Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter in einem teilautomatisierten Montagesystem, die Position der prozessrelevanten Merkmale am Produkt und der geforderte Montageprozess.

Das **virtuelle Modell** stellt alle prozessspezifischen Merkmale bereit, die für die Montage der Baugruppe innerhalb des teilautomatisierten Montagesystems erforderlich sind. Das virtuelle Modell ist damit an die Komplexität des Montagearbeitsplatzes angepasst und lässt sich einfach mittels eines Tabellenkalkulationsprogramms skalieren.

Im Bereich der **Konfiguration** findet die Gestaltung der Inbetriebnahme eines teilautomatisierten Montagearbeitsplatzes statt. Dabei müssen alle Positionen der einzelnen Systemkomponenten zueinander mathematisch beschrieben werden. Für das Bestimmen der Pose einzelner Systemkomponenten sind Lösungsansätze für ein schnelles und einfaches Bestimmen entscheidend.

Für die Auswahl einer geeigneten **Mensch-Maschine-Schnittstelle** ist die Akzeptanz der Montagemitarbeiter wichtig. Jedes teilautomatisierte Montagesystem muss den Mitarbeiter in seiner wertschöpfenden Tätigkeit mit den notwendigen Informationen versorgen, ohne dabei den Ablauf zu unterbrechen. Gerade für das Anpassen von Montageoperationen ist ein Austausch an Informationen zwischen Mensch und Maschine besonders wichtig.

Im **Arbeitsvorgang** wird das Bedienen von Prozessschritten im teilautomatisierten Arbeitsplatz während der Montage der Baugruppe gestaltet. Neben verschiedenen Ein- und Ausgabegeräten für das Ausführen und das Quittieren von Arbeitsinhalten verfügt das angepasste Bedienkonzept über eine intuitive Schnittstelle für die

Anpassung von prozessrelevanten Systemanforderungen. Die Anpassung erfolgt direkt auf dem betrieblichen Hallenboden und wird von dem Montagemitarbeiter selbst umgesetzt.

Die Prozessparameter einer Montageoperation müssen in einen automatisierten Prozessablauf überführt werden. In der **Prozessentwicklung** findet die Entstehung der automatisierten Montageoperation statt. In der Regel wird auf Basis von bisherigen manuellen Montageprozessen ein robuster automatisierter Montageprozess abgeleitet.

Anhand der Systematik zur Entwicklung eines angepassten Bedienkonzeptes, entsprechend des Gesamtsystems eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes (Kapitel 3.3) erfolgt die Auslegung des angepassten Bedienkonzeptes für den teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz.

Die Modellierung der Schweißkonstruktion erfolgt in der Regel in der Konstruktionsabteilung durch die Verwendung eines CAD-Programmes. Die Baugruppe wird dabei in einem 3D-Modell abgebildet und kann durch einfache Handhabung schnell und präzise mit Merkmalen erweitert werden. Durch standardisierte Datenformate können Konstruktionsdateien leicht in verschiedene CAD-Programme transferiert werden.

Die Planung der Prozessabläufe wird durch die Software-Erweiterung der rechnergestützten Konstruktionsprogramme, beispielsweise mittels Plug-In, im CAD-Programm ermöglicht. Dabei können direkt in der Produktentwicklung durch den Schweißfachingenieur die geforderten Prozessvorschriften der WPS hinterlegt werden. Das virtuelle Modell besteht aus einer tabellarischen Datenverwaltung, die alle Randbedingungen für eine Montage der kundenspezifischen Schweißkonstruktion beinhaltet. Dieses Modell kann durch verschiedene Tabellenkalkulationsprogramme geöffnet und falls gefordert angepasst werden. Die Konfiguration des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes sieht die Identifikation der Koordinatensysteme vor. Dabei wird der Mitarbeiter durch den Einsatz von Bildprojektoren auf dem betrieblichen Hallenboden unterstützt. Des Weiteren wird der Schweißfacharbeiter durch die Konfiguration bei der Einhaltung der Schweißvorzugslagen in den jeweiligen Montageprozessen unterstützt. Die Mensch-Maschine-Schnittstelle beinhaltet eine Werkeranweisung im Arbeitsumfeld des Mitarbeiters, wodurch die Visualisierung der Arbeitsschritte direkt an und auf der Schweißkonstruktion selbst dargestellt wird. Für den Arbeitsvorgang und für die Anpassungen der Systemanforderungen auf dem betrieblichen Hallenboden wird eine grafische Benutzeroberfläche eingesetzt. Die Prozessentwicklung erfolgt an einer Referenznaht, in der die geforderten Bewegungsabläufe, wie beispielsweise das Einfädeln und das Ausfädeln der Schweißnaht, entwickelt werden und die dazu geforderten Schweißparameter im programmierbaren Schweißgerät hinterlegt werden. Der Schweißprozess wird anschließend auf alle weiteren Schweißnähte der

Schweißkonstruktion übertragen. Dabei wird die konsistente Schweißqualität durch das entwickelte Messkonzept, in Kapitel 4.2, sichergestellt.

In den folgenden Unterkapiteln erfolgt die detaillierte Beschreibung der Entwicklung eines angepassten Bedienkonzeptes.

#### 4.1.1 Prozessplanung und Prozessentwicklung

Für die Montage einer individuellen Baugruppe ist die Planung und Entwicklung von Prozessabläufen erforderlich. Die Planung eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes beinhaltet dabei das Auswählen des Montageprozesses, die Art des Montageprozesses, die Zuweisung der Montageaufgaben zwischen manuell und automatisiert sowie die Beschreibung der Position und Orientierung der Montageaufgaben.

Mit entscheidend für die Wirtschaftlichkeit eines Montagearbeitsplatzes sind die Stillstandzeiten des Roboters während der Rekonfiguration und Programmierung der Roboterapplikation, insbesondere wenn damit der Produktionsablauf verzögert wird und die Programmierung nicht parallel erfolgen kann [109]. Um die Stillstandzeiten der Montagestation auf ein Minimum zu reduzieren, wird die Programmierung und Rekonfiguration durch die Konzeption eines virtuellen Modells vereinfacht. Für das Erstellen und das Bearbeiten des virtuellen Modells in CAD-Programmen sind Software-Erweiterungen erforderlich, die die Anforderungen des Produktionsablaufs berücksichtigen und alle geforderten Prozessparameter bereitstellen.

Um die Planung möglichst effizient zu gestalten, erfolgt das Erfassen der Daten so früh wie möglich. Im konkreten Fall der kundenspezifischen Montage von Schweißkonstruktionen erfolgt die Planung der Endmontage während der Modellierung der Baugruppe innerhalb der Konstruktionsabteilung. Eine einfache Softwareerweiterung ist in Abbildung 56 dargestellt. Die Erweiterung der Funktionen ist in einer separaten Menüleiste hinterlegt und beinhaltet alle Funktionen, die für die Planung der Schweißkonstruktion erforderlich sind.

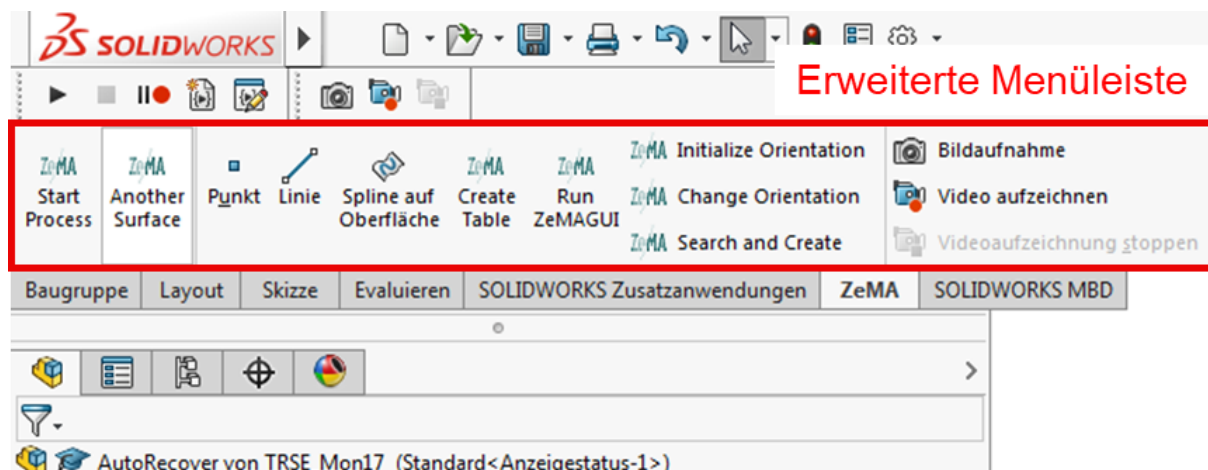


Abbildung 56 Erweiterung der Funktionalitäten vorhandener CAD-Programme



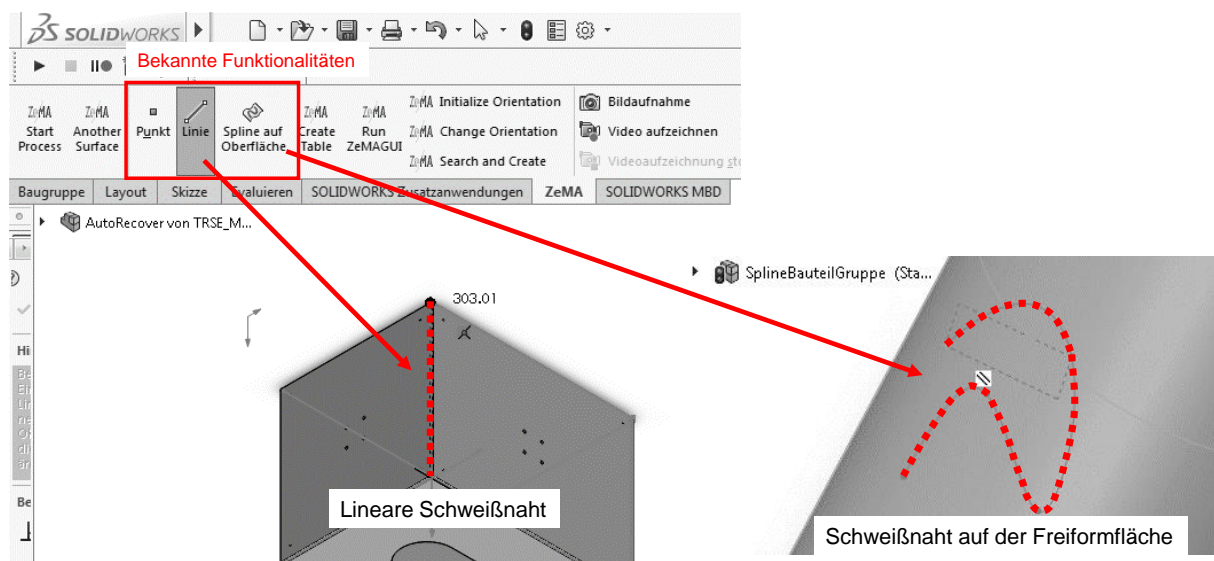
Der Konstrukteur, wie auch der Schweißfachingenieur, sind im Umgang mit CAD-Programmen vertraut und in der Lage, die Planung des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes mit den vertrauten Funktionalitäten durchzuführen.

Über ein Dialogfenster (Abbildung 57) kann der Schweißfachingenieur die Schweißvorschriften der jeweiligen Schweißkonstruktion festlegen. Während des Beschreibens der jeweiligen Montageprozesse wird im Hintergrund das virtuelle Modell der Baugruppe mit den Schweißvorschriften generiert und erstellt.



Abbildung 57 Einfaches Dialog-Fenster für die Planung des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes

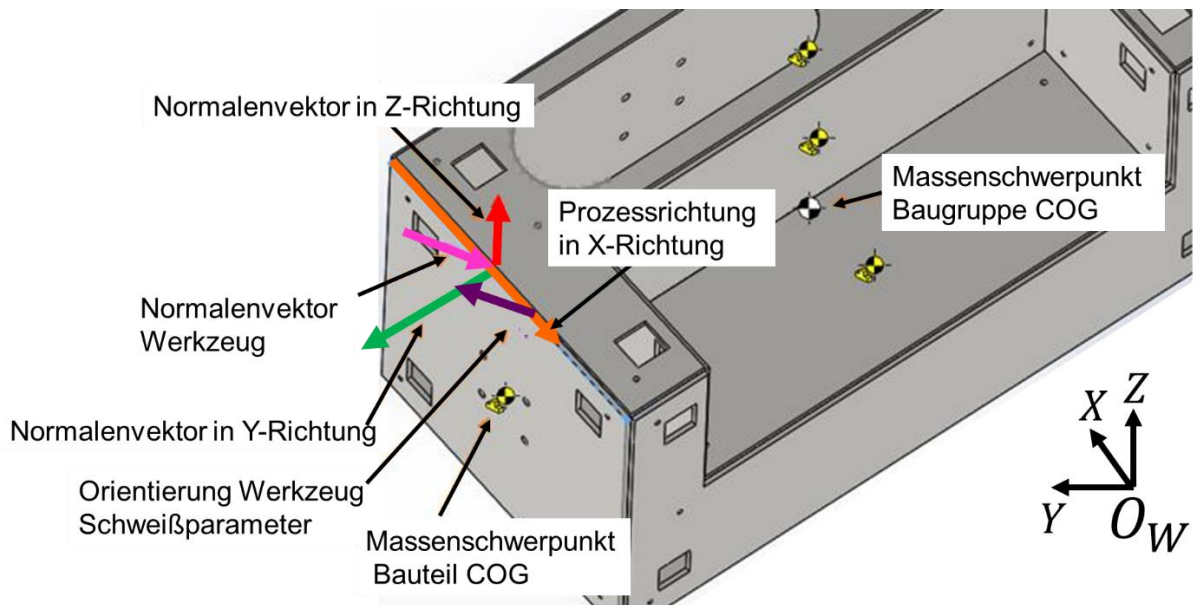
Im ersten Schritt findet die Auswahl der Montageprozesse statt. Dabei werden konsistente Prozessparameter über eine Bezeichnung ausgewählt sowie die entsprechenden Prozessmakros, welche spezifisch entwickelte Bewegungsabläufe der Montageprozesse beinhalten. Im Anwendungsfall Schweißen können während der Montage aus einer Prozessdatenbank die Prozessparameter, wie beispielsweise Schweißstrom, Schweißspannung und Drahtvorschubsgeschwindigkeit, ins automatisierte Schweißgerät geladen werden. Die Abfrage des Montagetyps beschreibt die Art der Montageoperation. Im Schweißprozess kann beispielsweise zwischen Punktschweißen, Schweißen einer linearen Naht oder dem Setzen einer Schweißnaht auf einer Freiformfläche (Abbildung 58) ausgewählt werden.



**Abbildung 58 Festlegung einer Schweißnaht als Linie und als Spline auf der Oberfläche**

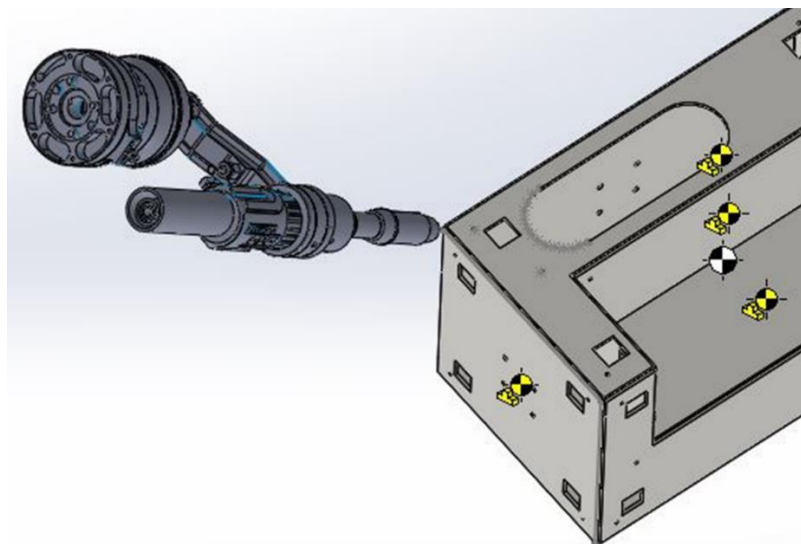
Zum Schluss wird aus dem Montageprozess und dem Typ der Montageaufgabe die Pose (Position und Orientierung) des Prozesswerkzeuges in Bezug auf das Bezugskoordinatensystem, gemäß der Abbildung 59, ermittelt.

Zunächst wird der Normalenvektor des Werkzeugs (Abbildung 59 in pink) über die Winkelhalbierenden der beiden Normalenvektoren in Z- und Y- Richtung (Abbildung 59 in rot und grün) gebildet. Für die Berechnung der Richtung des Normalenvektors des Werkzeugs werden der Massenschwerpunkt der Baugruppe und der Massenschwerpunkt des Bauteils in den Algorithmus mit einbezogen.



**Abbildung 59 Bestimmung der Pose des Prozesswerkzeugs an der jeweiligen Schweißnaht**

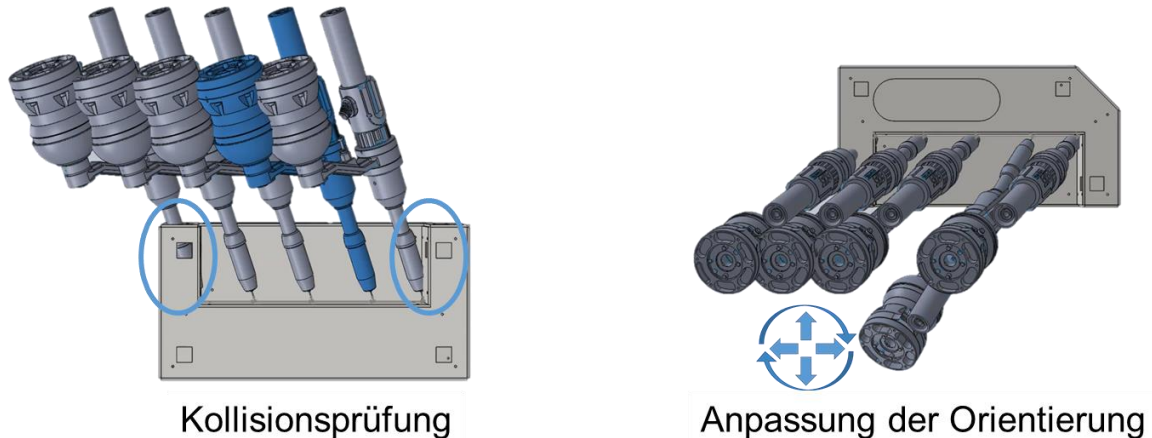
Die Prozessrichtung der Schweißnaht resultiert aus dem Start- und Endpunkt der Montageoperation. Die prozessspezifische Werkzeugstellung ergibt sich aus der gegebenen Orientierung der Schweißparameter (Abbildung 59 in lila) und dem Normalenvektor des Werkzeugs zur entsprechenden Schweißnaht. Abschließend wird das Werkzeug auf die prozessspezifische Werkzeugstellung ausgerichtet, dargestellt in der Abbildung 60.



**Abbildung 60 Prozessspezifische Werkzeugstellung an der Schweißnaht**

Zur Validierung des Montageprozesses kann das eingeblendete Werkzeug für eine einfache Kollisionsüberprüfung genutzt werden. In der Regel reicht die statische Betrachtung aus, mit dem stehenden Werkzeugmodell in der Baugruppe. Dazu wird

das Werkzeug entlang der Schweißnaht, unter der geforderten Orientierung, mehrfach eingefügt und nach der Überprüfung wieder verworfen (Abbildung 61 links). Auch hier wird auf bestehende Funktionalitäten der CAD-Programme zurückgegriffen. Über die Funktion der Kollisionsprüfung wird akustisch und/oder visuell auf die sich schneidenden Objekte hingewiesen.



**Abbildung 61 Kollisionsprüfung und Anpassung der Orientierung des Werkzeuges**

#### 4.1.2 Virtuelles Modell

Im Folgenden wird die Struktur des virtuellen Modells vorgestellt. Die Struktur basiert auf einer Datenbank, in der alle relevanten Randbedingungen für die Montage einer Schweißkonstruktion im teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz vorliegen. In der operativen Montage müssen keine Eintragungen im virtuellen Modell vorgenommen werden. In der Regel liegt das virtuelle Modell verborgen im teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz und wird nur für die Erstinbetriebnahme bzw. für eine Rekonfiguration am Schweißarbeitsplatz direkt in der Datenbank bearbeitet. Das virtuelle Modell bildet die Basis des Bedienkonzeptes und gewährleistet das einfache Einbinden von dezentralen Softwarefunktionalitäten, z.B. die Software-Erweiterung im CAD-Programm.

Die Abbildung 62 veranschaulicht alle Anforderungen, die im virtuellen Modell hinterlegt sind. Die Anforderungen sind in Bestandteile der Konfiguration und in Bestandteile der Prozessplanung unterteilt. Zur Konfiguration des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes gehört die Beschreibung der Betriebsmittel im teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz, die durch die Bezugskoordinatensysteme im virtuellen Modell hinterlegt sind. Die Anweisungen der einzelnen Montageprozesse sind ebenfalls in der Konfiguration gespeichert und können mit spezifischer Vorbereitung bzw. Nachbereitung der Prozesse ergänzt werden. Am Beispiel des Schweißens einer Edelstahlbaugruppe kann hier z.B. das Entfernen des Industrieklebebands oder das Einleiten von Prozessgasen eingetragen werden. Weiterhin ist die Auswahl bzw. die Zuordnung der Prozessmakros hinterlegt, welche



in einer Prozessentwicklung erstellt werden. Hiermit werden sowohl die Bewegungsabläufe des Prozesses als auch die geforderten Schweißparameter im Schweißarbeitsplatz bereitgestellt.

Die Prozessplanung des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes ist auf der rechten Seite der Abbildung 62 dargestellt. Sie beinhaltet die absoluten Positionen der Schweißnähte mit den geforderten Orientierungen des Werkzeugs sowie die Aufteilung der Nähte in manuelle und automatisierte Arbeitsschritte. Neben der Aufteilung wird für jede Schweißnaht das geforderte Prozessmakro festgelegt.

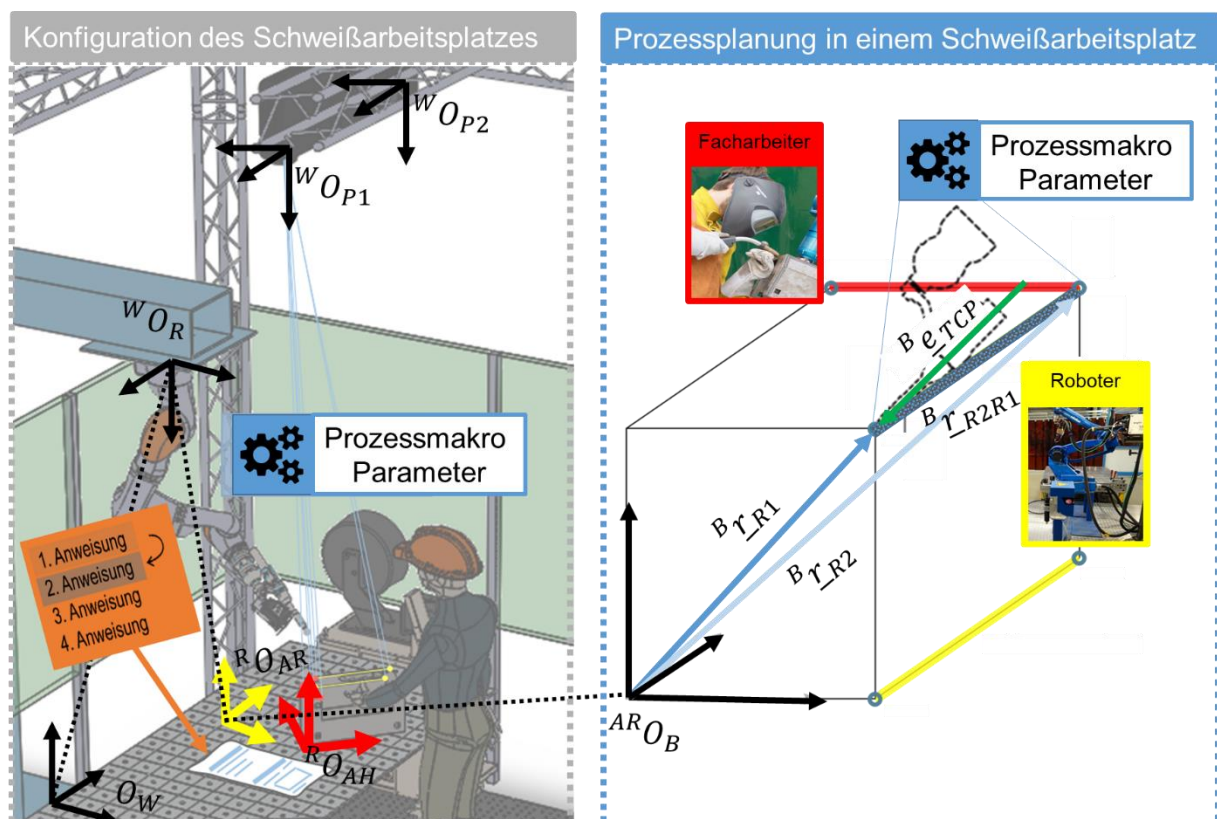


Abbildung 62 Konfiguration und Prozessplanung eines Schweißarbeitsplatzes

Diese Anforderungen werden durch die Software-Erweiterung in ein Tabellenkalkulationsprogramm exportiert, z.B. Produktname Microsoft Excel, welches die im Folgenden beschriebenen Tabellen beinhaltet.

Alle Punkte, die während des Ablaufs bearbeitet werden, werden in der Tabelle 1 gespeichert.

Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt der Tabelle **Data**. Die Punkte werden durch Bezeichner wie **Lin\_r1** identifiziert. Durch die Parameter ( $X, Y, Z$ ) wird ihre Position im Raum und mithilfe der Rotationsparameter wird die Orientierung ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) des Werkzeugs an diesem Punkt beschrieben. Diese Koordinaten werden relativ zu dem Bezugskoordinatensystem, das in der Spalte **Bezug** referenziert wird, interpretiert.

	X	Y	Z	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Bezug
<b>Punkte</b>							
LIN_R1	300	0	300	0	-135	0	Baugruppe
LIN_R2	300	400	300	0	-135	0	Baugruppe
LIN_M1	300	400	300	135	0	0	Baugruppe
LIN_M2	0	400	300	135	0	0	Baugruppe
LIN_R3	300	0	0	0	-46	0	Baugruppe
LIN_R4	300	400	0	0	-46	0	Baugruppe

**Tabelle 1 Data: Prozessbezogene Merkmale des Produktes im virtuellen Modell**

Die Koordinatensysteme werden in der Tabelle **Bezug** definiert (Tabelle 2). Unter der Spalte **Bezug** werden die Bezeichner für die jeweiligen Koordinatensysteme angegeben. Über die hier vergebenen Bezeichner können die Koordinatensysteme beispielsweise in der Tabelle **Data** referenziert werden.

	X	Y	Z	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Bezug	HumanRobot
<b>Bezug</b>								
ROOT	0	0	0	0	0	0		
Robot	484	982	1437	180	0	0	ROOT	
anschlag_r	402	770	0	0	0	0	ROOT	Robot
anschlag_h	750	1400	0	0	0	0	ROOT	Human
Baugruppe	0	0	300	0	0	0	anschlag_r	

**Tabelle 2 Bezug: Beschreibung der Koordinatensysteme im virtuellen Modell**

Die Spalten  $X, Y, Z$  kennzeichnen die kartesische Position des Koordinatensystems relativ zum übergeordneten Koordinatensystem. Die Spalten  $\alpha, \beta, \gamma$  kennzeichnen jeweils die Rotation des Koordinatensystems um die Achsen  $X, Y, Z$ . In der Spalte **Bezug** wird jeweils das übergeordnete Koordinatensystem angegeben. Relativ zu dem dort spezifizierten Koordinatensystem werden die Parameter  $(X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma)$  interpretiert.

Während der Bearbeitung der Schweißkonstruktion durch den Roboter muss diese Baugruppe an einem Anschlag positioniert werden, der im Arbeitsraum des Roboters liegt. Dieser kann jedoch schwer oder unkomfortabel für den Schweißfacharbeiter erreichbar sein (Abbildung 63). Deshalb bietet die Spalte **HumanRobot** die

Möglichkeit, Koordinatensysteme mit Mensch oder Roboter zu kennzeichnen. Ist ein Koordinatensystem mit **Robot** gekennzeichnet, so wird die Baugruppe vor der Bearbeitung durch den Roboter am Bezugskoordinatensystem Anschlag Robot  ${}^R O_{AR}$  (vgl. Abbildung 62) positioniert. Wird jedoch eine manuelle Schweißnaht an der Baugruppe gesetzt, ist diese mit **Human** gekennzeichnet. Die Baugruppe wird im Arbeitsraum des Werkers am Bezugskoordinatensystem Anschlag **Human**  ${}^R O_{AH}$  positioniert, wenn der aktuelle Arbeitsschritt vom Werker ausgeführt wird.

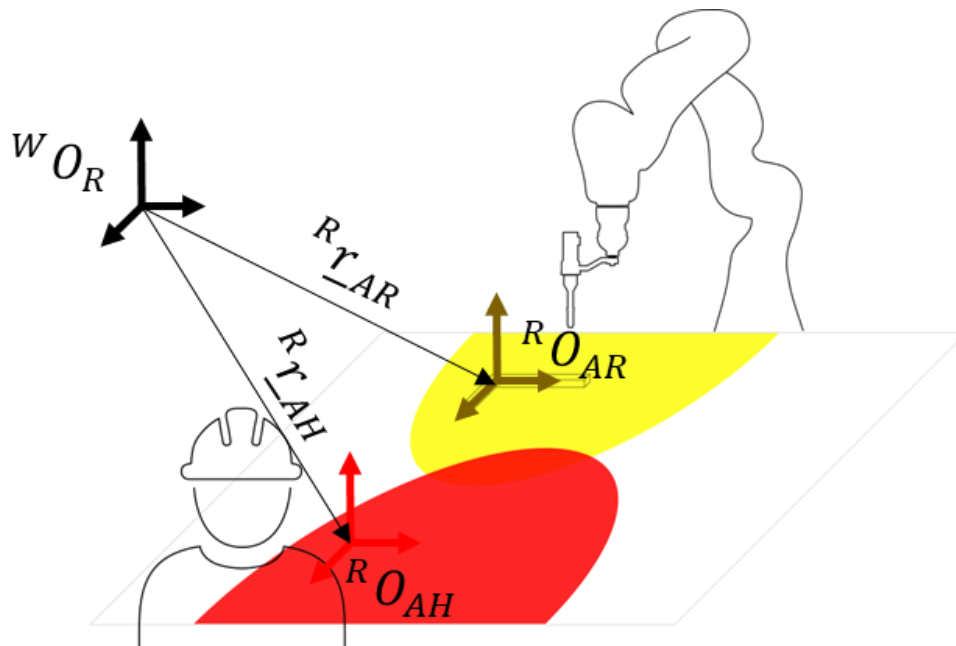


Abbildung 63 Arbeitsraum Mensch und Roboter in einer Montagezelle

In der Tabelle **Gruppen** werden die einzelnen Punkte zu Gruppen zusammengefasst. Ein Ausschnitt ist in Tabelle 3 gezeigt und in Abbildung 64 veranschaulicht.

Gruppen	Pose	Pose
WeldingA_LIN_Robot-1	LIN_R1	LIN_R2
WeldingB_LIN_Human-1	LIN_H1	LIN_H2
WeldingA_LIN_Robot-2	LIN_R3	LIN_R4

Tabelle 3 Gruppen: Zuordnung der Merkmale im virtuellen Modell

Die erste Spalte beinhaltet wiederum, den durch die Software-Erweiterung generierten Bezeichner der Gruppe, beispielsweise **WeldingA\_LIN\_Robot-1**. Dieser ist wie folgt aufgebaut: [Macro]\_[Bewegungsart]\_[bearbeitet von]-[Zahl]. Je nach Angabe von

[Macro] wird die Gruppe durch den Roboter mit dem dort entsprechend hinterlegten Makro ausgeführt. Durch den Teil [Bewegungsart] wird definiert, mit welcher Bewegungsart die dazugehörigen Posen vom Roboter angefahren werden. [bearbeitet von] gibt an, ob die Posen der Gruppe durch den Roboter oder vom Menschen bearbeitet werden. Nach dem Bezeichner der Gruppe werden die Bezeichner der dazugehörigen Posen aus der Tabelle 1 **Data** aufgelistet.

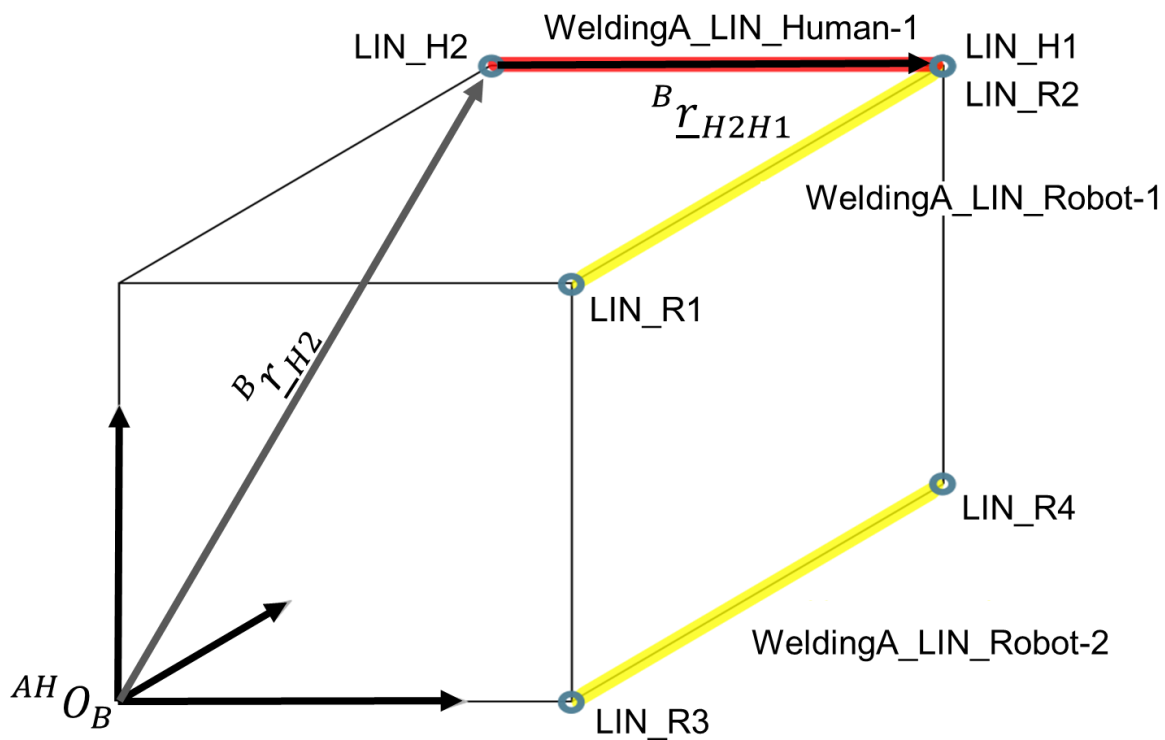


Abbildung 64 Visualisierung des virtuellen Modells an der Baugruppe

Jede Gruppe von Punkten wird als Aufgabenteil interpretiert. In der Reihenfolge, in der die Gruppen in der Tabelle **Gruppen** angegeben werden, werden automatisch Anweisungen für den Werker generiert, die ihn durch die verschiedenen Schritte leitet.

Je nach Aufgabe müssen durch den Werker oder Roboter an den spezifizierten Punkten unterschiedliche Prozesse (Schweißen, Kleben, etc.) ausgeführt werden. Sowohl für Punkte, die vom Menschen als auch für solche, die vom Roboter bearbeitet werden, müssen diese im virtuellen Modell bekannt sein. In der Tabelle **TypeMapping** (Tabelle 4) kann eine entsprechende Zuweisung vorgenommen werden. In der ersten Spalte wird dabei der Bezeichner der Gruppe angegeben. Die zweite Spalte enthält den Bezeichner des entsprechenden Prozesstyps. Auf der Robotersteuerung sind dann für den Prozesstyp verschiedene Parameter hinterlegt.



<b>SolidWorksID</b>	<b>ProcessType</b>
WeldingA	TypeWelding
WeldingB	TypeWelding

**Tabelle 4 TypeMapping:** Die Bezeichner werden mit den entsprechenden Prozesstypen verknüpft

Für unterschiedliche Prozesse ist es vor der eigentlichen Ausführung der Aufgabe an den definierten Punkten erforderlich, Vorbereitungen bzw. Nachbereitungen zu treffen. Diese können in der Tabelle **TypeAdvices** (Tabelle 5) definiert werden.

<b>TypeWelding</b>	
<b>Pre-Processing</b>	
Vorbereitung zum Schweißen von Baustahlbaugruppen	Vorbereitung zum Schweißen von Edelstahlbaugruppen
<b>Post-Processing</b>	
Nachbereitung zum Schweißen von Baustahlbaugruppen	Nachbereitung zum Schweißen von Edelstahlbaugruppen

**Tabelle 5 TypeAdvices:** Prozesse mit spezifischer Vorbereitung bzw. Nachbereitung

Hier können pro Prozesstyp (im Beispiel aus Tabelle 5 der Typ **TypeWelding**) eine Reihe von Vorbereitungs- bzw. Nachbereitungsschritten angegeben werden. Während der automatischen Anweisungsgenerierung wird dann für jede Gruppe, die mit einem hier eingetragenen Prozesstyp verknüpft ist, die Anweisungen aus der Tabelle übernommen und als Anweisung vor bzw. nach der Anweisung, die das eigentliche Bearbeiten der Punkte beschreibt, eingefügt.

#### 4.1.3 Konfiguration

Nachdem das virtuelle Modell erstellt wurde, muss der teilautomatisierte Schweißarbeitsplatz konfiguriert werden. Die Konfiguration des Arbeitsplatzes beinhaltet die Identifikation der Koordinatensysteme. Dazu werden die vorher beschriebenen Assistenzsysteme verwendet, um den Mitarbeiter zu unterstützen. Das heißt, es müssen in der Erstinbetriebnahme des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes zum einen die Posen der einzelnen Komponenten auf dem betrieblichen Hallenboden definiert werden und zum anderen müssen die Assistenzsysteme für die Visualisierung kalibriert sowie deren Posen bestimmt werden.

Des Weiteren beinhaltet die Konfiguration eine Sicherstellung der Vorzugslage in der operativen Montage und stellt eine Assistenz für die Wiederinbetriebnahme einer neuen Variante bereit.

Eine visuelle Assistenz stellt z.B. der Bildprojektor und/oder das Laserprojektionssystem dar und kommt in vielen Bereichen der Produktion zum Einsatz. Diese Projektionssysteme unterstützen die Mitarbeiter bei manuellen Tätigkeiten und sichern die Qualität der Montage ab [96]. In der Montage von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen können visuelle Assistenzsysteme zum Beispiel genutzt werden, um dem Schweißfacharbeiter die Schweißvorschrift, Arbeitsanweisungen und Montageinformationen direkt am Arbeitsplatz auf dem Tisch anzuzeigen.

Je nach Art des Informationsgehalts unterscheiden sich die verschiedenen Visualisierungssysteme. Ein etabliertes Visualisierungssystem in der Industrie ist das Laserprojektionssystem, welches über eine hohe Visualisierungsdistanz verfügt bei gleichzeitig guter Kontraststärke und Präzision des Informationsgehalts. Das Laserprojektionssystem eignet sich für das Projizieren einer Position eines Bauteils oder als Kontrollfunktion. Ein Bildprojektor hingegen eignet sich besonders für hohe Auflösungen, farbliche Visualisierungen und das Anzeigen von komplexeren Arbeitsanweisungen.

### Posendefinition der Komponenten

Die Posen der einzelnen Komponenten (Roboter, Bauteil, Anschlag, etc.) werden ebenfalls in der Excel Tabelle **Bases** definiert (Tabelle 6).

	X	Y	Z	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	Base	Human_Robot
<b>Bases</b>								
ROOT	0	0	0	0	0	0		
Robot	484	982	1437	180	0	0	ROOT	
anschlag_r	402	770	0	0	0	0	ROOT	Robot
anschlag_h	750	1400	0	0	0	0	ROOT	Human
Baugruppe	0	0	300	0	0	0	anschlag_r	
Projektor_1	600	1600	2300	8	13	~0	ROOT	
Projektor_2	1000	1600	2300	6	348	~0	ROOT	

**Tabelle 6 Bases: Posendefinition der Komponenten**

In der ersten Spalte wird jeweils der Bezeichner des Basiskoordinatensystems angegeben. Danach folgen die Parameter ( $X, Y, Z$ ), die die kartesische Position

bestimmen. Diese werden relativ zu dem in der Spalte **Bases** angegebenen Koordinatensystem interpretiert. Die Parameter  $(\alpha, \beta, \gamma)$  definieren dabei die Rotation des Koordinatensystems um die  $(Z, Y, X)$ -Achse. In der Spalte **Human\_Robot** kann je ein Koordinatensystem als Bezugskoordinatensystem für die Baugruppe angegeben werden. Werden in einem Arbeitsschritt Posen durch den Menschen bearbeitet, so wird die Baugruppe in Bezug auf das Koordinatensystem berechnet, welches hier mit **Human** gekennzeichnet ist. Ebenfalls wird die Baugruppe in Bezug auf das Koordinatensystem, welches mit **Robot** gekennzeichnet ist, berechnet, wenn in einem Arbeitsschritt Posen durch den Roboter bearbeitet werden.

### Kalibrierung der visuellen Assistenzsysteme im dreidimensionalen Raum

Für die Kalibrierung von Bildprojektoren gibt es verschiedene Kalibriermethoden für die Bestimmung der geometrischen und optischen Parameter eines Bildprojektors. Generell unterscheiden sich die Einflussfaktoren der Kalibrierung eines Bildprojektors in extrinsische und in intrinsische Parameter, sowie zusätzlich im Korrekturfaktor für die Linsenverzerrung. Das Verfahren für die Ermittlung der Einflussfaktoren wurde bereits von R. Y. Tsai im Jahre 1986 veröffentlicht [110].

Um die aktuell zu bearbeitenden Montageaufgaben, wie beispielsweise eine Linie bzw. einen Punkt, auf die Baugruppe projizieren zu können, müssen diese im 3-dimensionalen Raum projiziert werden. Die Koordinaten  $(X, Y, Z)$  der entsprechenden Montageaufgaben sind durch das virtuelle Modell gegeben. Allerdings muss die Visualisierung einer Montageaufgabe, die mittels Bildprojektor projiziert werden soll, in dessen Pixelkoordinaten angegeben werden. Diese umfassen jedoch nur die 2 Dimensionen  $(X, Y)$ . Deshalb müssen die bekannten Koordinaten  $(X, Y, Z)$  in Pixelkoordinaten  $(X, Y)$  transformiert werden. Dadurch werden die Montageaufgaben des virtuellen Modells in der Realität an die entsprechenden Stellen durch Punkte bzw. Linien auf die Baugruppe projiziert.

Eine solche Transformation lässt sich mit einer Projektionsmatrix **P** durchführen. In homogenen Koordinaten kann die Transformation als

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

angegeben werden, wobei sich die gesuchte Projektionsmatrix **P** des Bildprojektors aus der intrinsischen Matrix **I** und der extrinsischen Matrix **E** zusammensetzt [111].

$$\mathbf{P} = \mathbf{I}\mathbf{E} \quad (4.2)$$

Die intrinsische Matrix **I** besteht aus den Parametern, der effektiven Brennweite  $f$ , der Pixelwerte in X-Richtung  $X$  und in Y-Richtung  $Y$  auf der Bildebene und dem Skalierungsfaktor  $s$ .

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} f_x & s & x \\ 0 & f_y & y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Wohingegen die extrinsische Matrix  $\mathbf{E}$  in homogenen Koordinaten die Transformation zwischen dem Weltkoordinatensystem und dem Bezugskoordinatensystem des Bildprojektors beschreibt, die sich in Form der Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  und dem Translationsvektor  $\underline{r}$  ergeben.

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \underline{r} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Die Verfahren für die Ermittlung der Parameter erfordern in der Regel weitere Sensoren und Berechnungsprogramme und erfordern tiefgründiges Fachwissen im Bereich der rechnergestützten Bildverarbeitung, beispielsweise für das gängigste Verfahren nach R. Y. Tsai.

Der Einsatz des visuellen Assistenzsystems im teilautomatisierten Arbeitsplatz erfordert nicht die Qualität an Genauigkeit der 3D-Weltkoordinaten und Bildkoordinaten, wie beispielsweise für optische Messverfahren. Daher wurde ein Verfahren mit der notwendigen Projektionsgenauigkeit entwickelt, welches mit einfachen Mitteln die Kalibrierung des Bildprojektors und somit die schnelle Ermittlung der Einflussfaktoren ermöglicht. Dabei wird die Projektionsmatrix  $\mathbf{P}$  durch eine 3 x 4 Matrix angegeben.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{P} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}; \text{ mit } \mathbf{P} = \begin{pmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Die Kalibrierung besteht darin, die Koeffizienten  $t_{ij}$  zu bestimmen. Die Berechnung der Koeffizienten  $t_{ij}$  erfolgt durch das Lösen eines linearen Gleichungssystems.

Dazu werden 4 Vektoren, deren Pixelkoordinaten in X- und Y-Richtung (Abbildung 65) bekannt sind, projiziert (Abbildung 66). Dann werden die entsprechenden Vektoren  ${}^W\underline{r}_{P1}, \dots, {}^W\underline{r}_{P4}$  in Bezug auf das Koordinatensystem  $O_W$  gemessen.

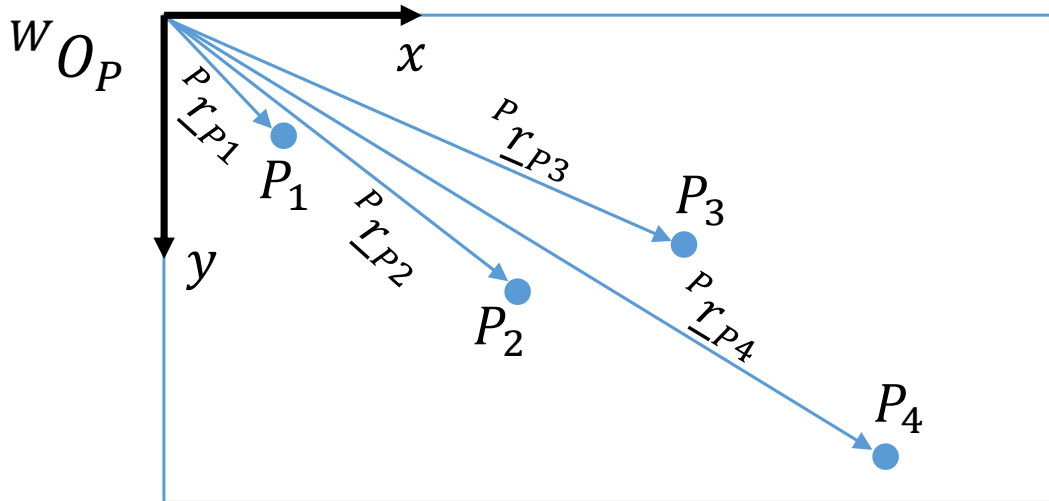


Abbildung 65 Vier bekannte Pixelkoordinaten auf der Bildebene des Projektors

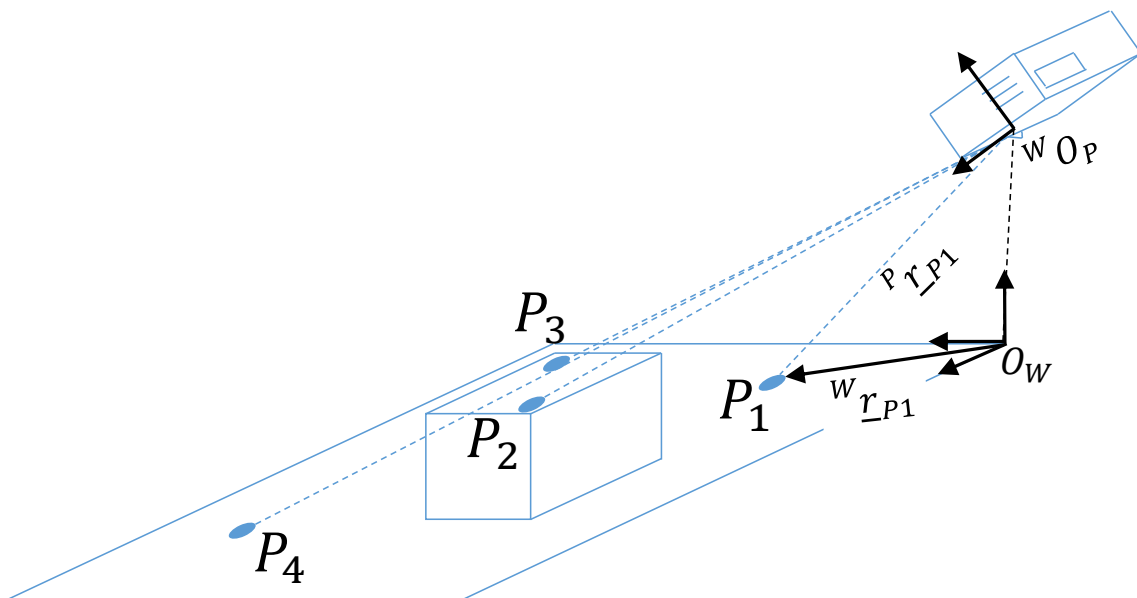


Abbildung 66 Projektion der Pixelkoordinaten auf der Baugruppe

Die Koeffizienten  $t_{ij}$  werden durch Einsetzen der Vektorkoordinaten und Lösen der folgenden linearen Gleichungssysteme bestimmt.

$${}^P r_{P1x} = {}^W r_{P1x} \cdot t_{11} + {}^W r_{P1y} \cdot t_{12} + {}^W r_{P1z} \cdot t_{13} + t_{14} \quad (4.6)$$

$$\dots$$

$${}^P r_{P4x} = {}^W r_{P4x} \cdot t_{11} + {}^W r_{P4y} \cdot t_{12} + {}^W r_{P4z} \cdot t_{13} + t_{14} \quad (4.7)$$

$${}^P r_{P1y} = {}^W r_{P1x} \cdot t_{21} + {}^W r_{P1y} \cdot t_{22} + {}^W r_{P1z} \cdot t_{23} + t_{24} \quad (4.8)$$

$$\dots$$

$${}^P r_{P4y} = {}^W r_{P4x} \cdot t_{21} + {}^W r_{P4y} \cdot t_{22} + {}^W r_{P4z} \cdot t_{23} + t_{24} \quad (4.9)$$

## Sicherstellung der Vorzugslage im Schweißprozess

Die Schweißkonstruktion wird unter der Berücksichtigung der WPS montiert und unterliegt einer Schweißreihenfolge in einer definierten Vorzugslage. Je nach Schweißnaht ist die Baugruppe in unterschiedlichen Posen auf dem Tisch des Arbeitsplatzes zu positionieren, um die geforderte Qualität der Schweißnaht sicherzustellen.

Während der Erstellung des virtuellen Modells werden bei der Definition der Posen  ${}^B e_{TCP}$  neben der Position im Raum  $(X,Y,Z)$  immer auch die Orientierung des Werkzeugs  $(\alpha,\beta,\gamma)$  in dieser Position angegeben. Dabei beschreiben die Parameter  $\alpha,\beta,\gamma$  jeweils die Drehung des Werkzeugs um die  $X,Y,Z$  Achse. Die Parameter  $(X,Y,Z,\alpha,\beta,\gamma)$  werden dabei relativ zu dem Bezugskordinatensystem der Schweißkonstruktion angegeben.

In Abbildung 67 ist beispielsweise die geforderte Vorzugslage für die jeweilige Naht der Schweißkonstruktion und der möglichen Orientierung des Werkzeugs beim Schweißen angedeutet. Soll eine Naht wie in der rechten Abbildung am unteren Teil der Baugruppe geschweißt werden, die auf dem Boden steht, lässt sich diese Orientierung zwar definieren, jedoch in der Praxis nicht ausführen und befindet sich nicht in der geforderten Vorzugslage (Abbildung 67).

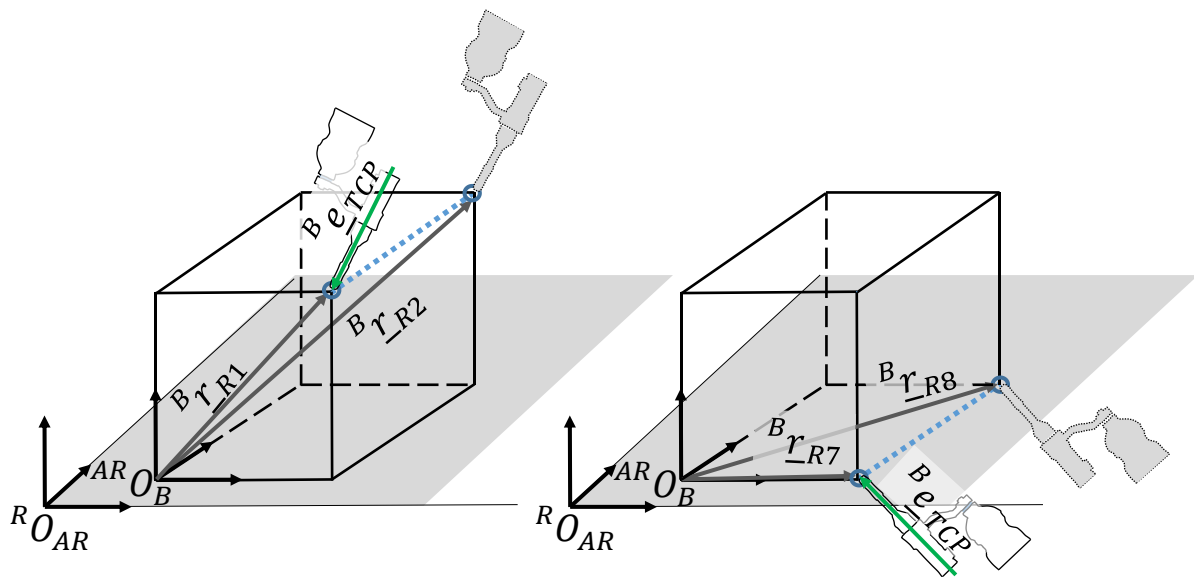


Abbildung 67 Geforderte Vorzugslage beim Schweißen der kundenspezifischen Baugruppe

Deshalb wird vor jedem Arbeitsschritt überprüft, ob die Baugruppe gedreht werden muss, um ein Bearbeiten der Punkte in Vorzugslage zu ermöglichen. Ist ein Drehen der Schweißkonstruktion erforderlich, wird zudem eine mögliche Rotations- und Translationssequenz berechnet. Je nach Schweißvorschrift ist ein mehrmaliges Umpositionieren der Baugruppe in der operativen Montage erforderlich.

Im Folgenden wird eine Methode zur Sicherstellung der Vorzugslage im Schweißprozess vorgestellt, dabei wird die Vorzugslage der jeweiligen Schweißnaht basierend auf dem virtuellen Modell der Baugruppe und dem Tischanschlag bestimmt.

### Überprüfung der Vorzugslage

Um zu überprüfen, ob die Schweißkonstruktion vor dem Setzen einer Schweißnaht gedreht werden muss, wird zunächst der Richtungsvektor  ${}^B\underline{e}_{TCP}$  gegen unendlich skaliert und in die Parameterform überführt (4.10) und gemäß der Formel (4.10) an dem zu überprüfenden Punkt  ${}^B P_{R1}$  mit dem Richtungsvektor  ${}^B\underline{e}_{TCP}$  aufgespannt.

$${}^{B^\infty}\underline{e}_{TCP}(\lambda) = {}^{AR}\underline{r}_{R1} + \lambda * {}^B\underline{e}_{TCP} \quad (4.10)$$

Dabei zeigt der Vektor  ${}^{B^\infty}\underline{e}_{TCP}$  am Punkt  ${}^B P_{R1}$  in die gleiche Richtung des Werkzeugs  ${}^B\underline{e}_{TCP}$  (Abbildung 68). Der Punkt  ${}^B P_{R1}$  wird aus dem Bezugskordinatensystem  ${}^R O_{AR}$  über die Abbildungsmatrix  ${}^{AR}\mathbf{A}_B$  mit dem Vektor  ${}^{AR}P_{R1}$  ausgedrückt.

$${}^{AR}P_{R1} = {}^{AR}\mathbf{A}_B * {}^B P_{R1} \quad (4.11)$$

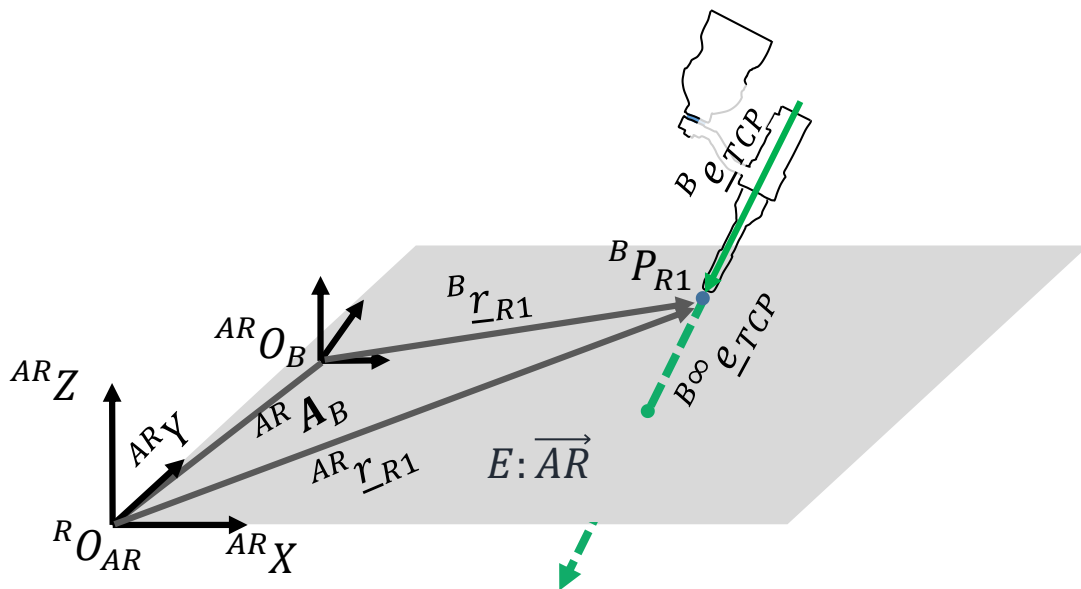


Abbildung 68 Aufspannen eines Hilfsvektors für die Überprüfung der Vorzugslage

Anschließend wird die Ebene  $E: \overrightarrow{AR}$  als Normalform (4.12) mit dem Normalvektor  ${}^{AR}\underline{z}$ , dem Stützvektor  ${}^{AR}\underline{x}$  und einem Ortsvektor  ${}^{AR}\underline{p}$  mit den Koordinaten (1,1,0) aufgespannt.

$$E: \overrightarrow{AR} = \left( {}^{AR}\underline{x} \quad - {}^{AR}\underline{p} \right) \cdot {}^{AR}\underline{z} = 0 \quad (4.12)$$

Dann wird, wie in Abbildung 69 dargestellt, überprüft, ob sich der Vektor  ${}^{B^\infty}\underline{e}_{TCP}$  und die Ebene  $E:\overrightarrow{AR}$  schneiden. Dazu wird  ${}^{B^\infty}\underline{e}_{TCP}$  in  $E:\overrightarrow{AR}$  eingesetzt und nach  $\lambda$  aufgelöst:

$$\left( ({}^{AR}\underline{r}_{R1} + \lambda * {}^B\underline{e}_{TCP}) - {}^{AR}\underline{p} \right) * {}^{AR}\underline{z} = 0 \quad (4.13)$$

$$\lambda = \frac{({}^{AR}\underline{p} - {}^{AR}\underline{r}_{R1}) * {}^{AR}\underline{z}}{{}^B\underline{e}_{TCP} * {}^{AR}\underline{z}} \quad (4.14)$$

Ist  ${}^B\underline{e}_{TCP} * {}^{AR}\underline{z} = 0$ , so sind  ${}^{B^\infty}\underline{e}_{TCP}$  und  $E:\overrightarrow{AR}$  parallel. In diesem Fall muss die Baugruppe gedreht werden. Ist  $\lambda > 0$ , so liegt eine Situation wie in Abbildung 69 links dargestellt vor, die Schweißkonstruktion muss also nicht gedreht werden.

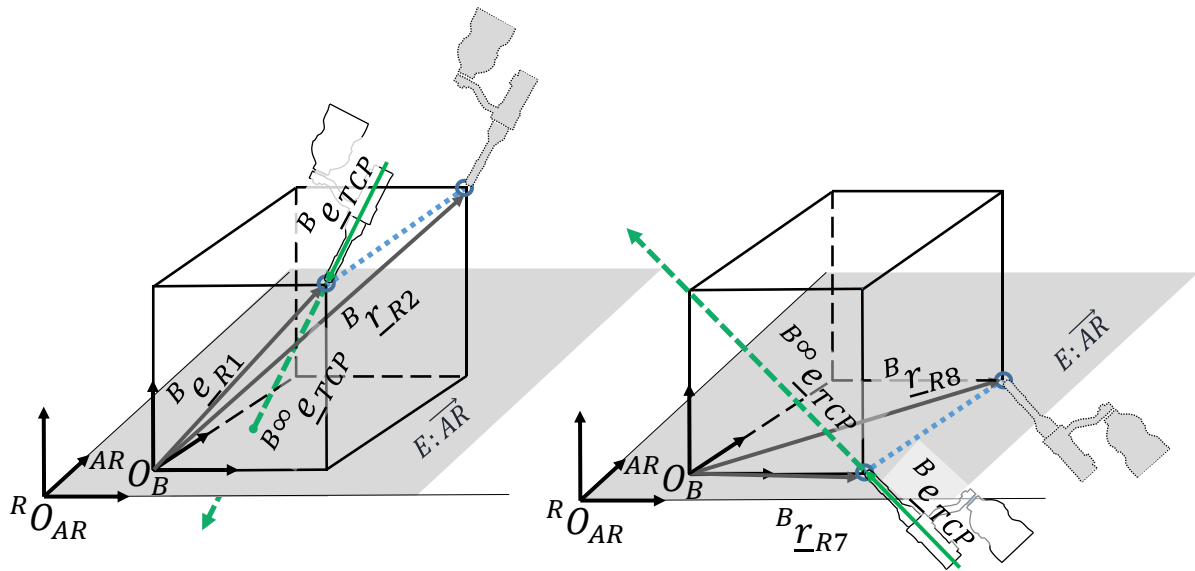


Abbildung 69 Überprüfung der Vorzugslage

Für  $\lambda < 0$  liegt eine Situation wie in Abbildung 67 rechts gezeigt bzw. Abbildung 69 rechts dargestellt vor und die Baugruppe muss gedreht werden.

#### 4.1.4 Mensch-Maschinen-Schnittstelle

Um den Facharbeiter optimal während der Montage der Baugruppe zu unterstützen, wird der aktuelle Zustand der Anlage sowie die aktuell zu bearbeitenden Aufgaben durch ein visuelles Assistenzsystem dargestellt. Eine einfache Interaktion mit dem System wird durch eine offene Schnittstelle ermöglicht, die durch verschiedene Eingabegeräte wie einer App auf einem Tablet, einer Smartwatch oder gestengesteuerten Eingabegeräten angesprochen werden kann.



## Werkeranweisungen

Je nach Prozess ist häufig eine bestimmte Abfolge von Arbeitsschritten notwendig, um die Qualität des Endproduktes sicherzustellen. Diese Abfolge kann durch den Planer beim Erstellen des virtuellen Modells, durch die Reihenfolge der Gruppen festgelegt werden. Um die Einhaltung dieser Reihenfolge zu gewährleisten, werden aus dem virtuellen Modell Anweisungen für den Werker generiert (Abbildung 70).

Die Anweisungen enthalten jeweils eine Beschreibung, die die aktuellen Montageaufgaben vorgeben. Außerdem ist farblich gekennzeichnet, ob es sich um eine Aufgabe für den Menschen oder für den Roboter handelt und ob Punkte an der Baugruppe bearbeitet werden müssen. Ist dies der Fall, so werden diese zusätzlich mithilfe einer Visualisierung auf der Baugruppe dargestellt.

Neben dem reinen Bearbeiten der Punkte an der Baugruppe können je nach Montageprozess bestimmte Vor- bzw. Nachbereitungen notwendig sein. Diese können während der Konfiguration mit dem entsprechenden Prozess verknüpft werden. Sind solche angegeben, so werden diese beim Generieren der Anweisungen automatisch vor bzw. nach der entsprechenden Aufgabe eingefügt.

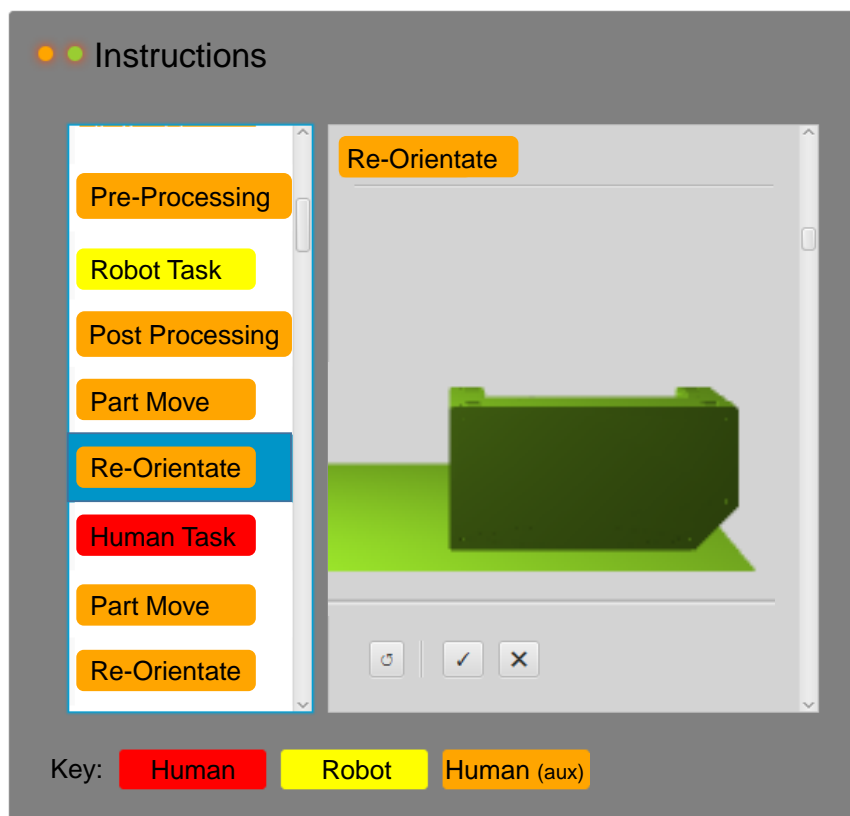


Abbildung 70 Werkeranweisung im Sichtfeld des Werkers

Des Weiteren muss je nach Prozess eine gewisse Vorzugslage sichergestellt sein. Um dies zu gewährleisten, wird zudem automatisch eine Umpositionierung der Baugruppe

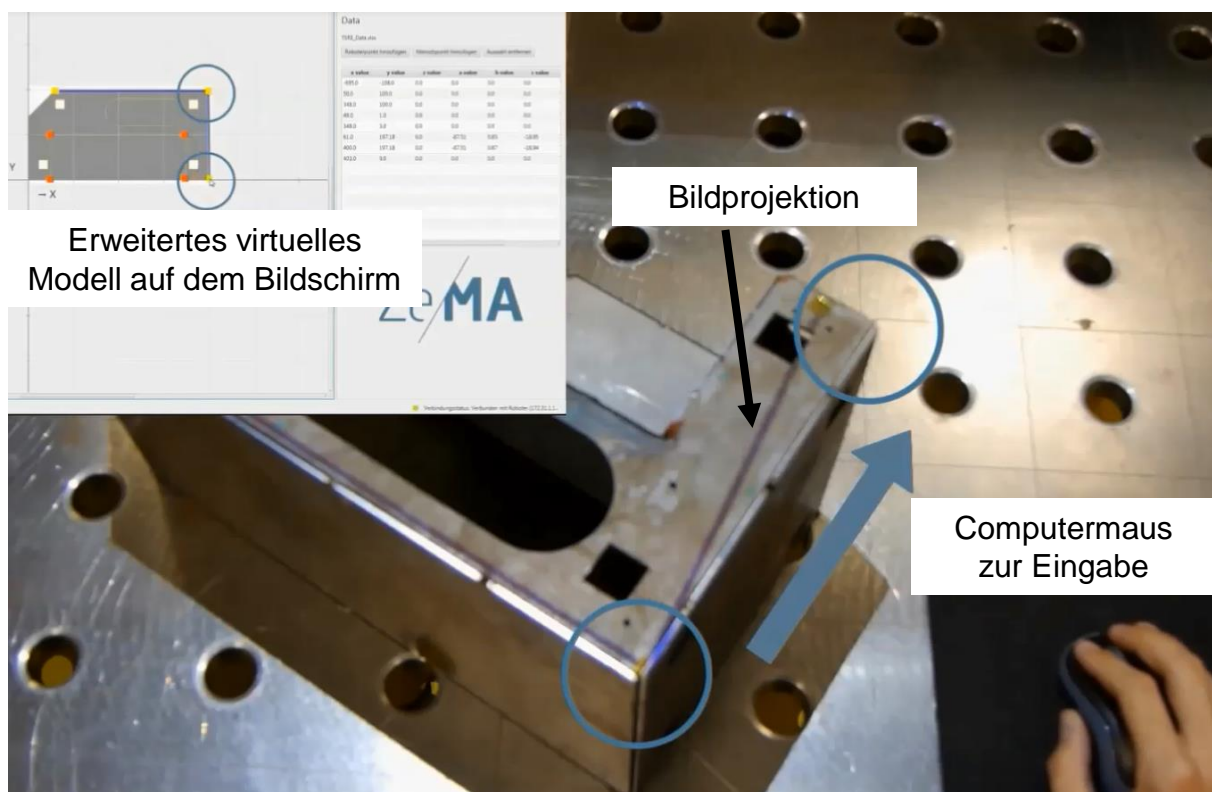
berechnet (vgl. Kapitel 4.1.3) und als Animation vor dem entsprechenden Aufgabenteil eingefügt. Die eingebundene Animation kann beispielsweise direkt auf den Schweißtisch projiziert werden.

### Visualisierung von Arbeitsschritten an der Baugruppe

Neben der Visualisierung von Werkeranweisungen werden die auszuführenden Arbeitsschritte durch ein visuelles Assistenzsystem an der Baugruppe gekennzeichnet. Anhand des virtuellen Modells werden die Posen des jeweiligen Arbeitsschrittes ausgelesen und mittels vorgestellter Methode zur Posenbestimmung im dreidimensionalen Raum (vgl. Kapitel 4.1.3) auf der Baugruppe visualisiert.

Zusätzlich zu der eindeutigen Pose werden dem Werker durch die Projektion weitere Informationen bereitgestellt.

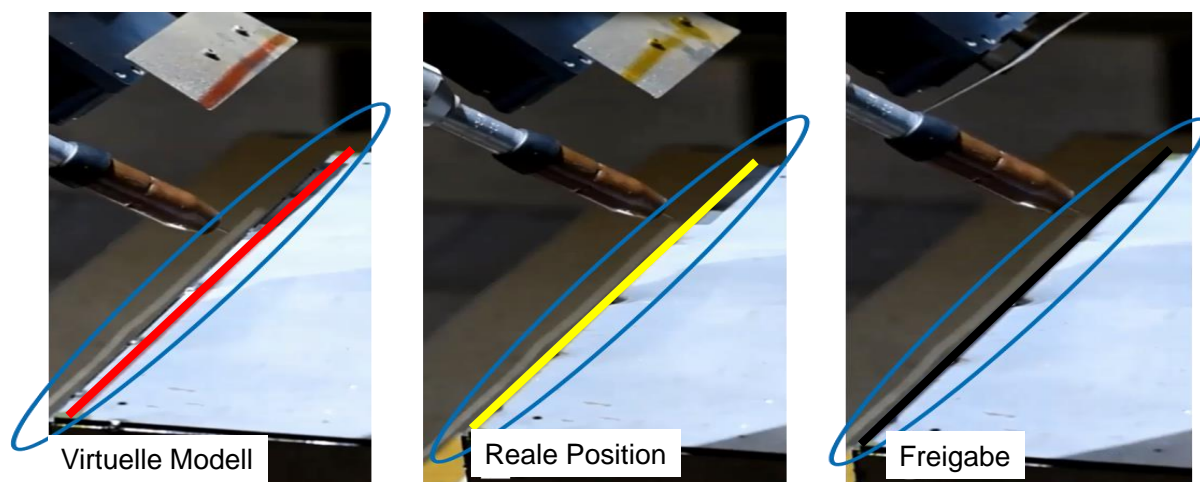
Müssen im aktuellen Arbeitsschritt Posen an der Baugruppe bearbeitet werden, kann der Arbeitsschritt im virtuellen Modell einfach und eindeutig auf die reale Baugruppe übertragen werden. Die Abbildung 71 veranschaulicht die Erweiterung des virtuellen Modells auf der Benutzeroberfläche, die digitale Projektion an der Baugruppe und die Verwendung einer Computermouse als Eingabegerät.



**Abbildung 71** Bedienerführung und Eingabemöglichkeiten im teilautomatisierten Arbeitsplatz

Wird ein Arbeitsschritt vom Werker oder durch den Montageablauf ausgewählt, so wird die Verbindungslinie der dazugehörigen Pose, dargestellt als Punkte (siehe Abbildung 72), in Rot auf der Baugruppe visualisiert. Dadurch wird signalisiert, dass die

Positionen der Punkte lediglich aus dem virtuellen Modell übernommen wurden. Durch Bauteiltoleranzen, Veränderungen der Abmessungen während des Prozesses oder einer unpräzisen Positionierung des Bauteils müssen diese Posen nicht zwangsläufig mit den realen Posen übereinstimmen. Mithilfe des Messkonzeptes, können die Posen der Punkte vor Bearbeitung durch das Robotersystem überprüft und durch den Werker korrigiert werden. Ein entsprechender Korrekturvorschlag wird übertragen und in Gelb dargestellt. Diesen Korrekturvorschlag kann der Werker dann bestätigen oder verwerfen. Wird die Korrektur bestätigt, so wird die Verbindungslinie der Punkte in Schwarz gekennzeichnet. Damit wird dem Werker signalisiert, dass alle nötigen Vorbereitungen zum Bearbeiten der Arbeitsschritte getroffen wurden. (Abbildung 72)



**Abbildung 72** Visualisierung der Arbeitsschritte auf der Baugruppe mit Hilfe eines Bildprojektors

#### 4.1.5 Anpassung der Systemanforderungen

Eine Anpassung der Systemanforderungen in dem teilautomatisierten Arbeitsplatz ermöglicht eine schnelle Reaktionszeit auf sich ändernde Produktanforderungen oder das Kompensieren von Planungsfehlern in der Produktentwicklung einer Baugruppe.

Durch den Einsatz einer grafischen Benutzeroberfläche wird der Anpassungsprozess vereinfacht.

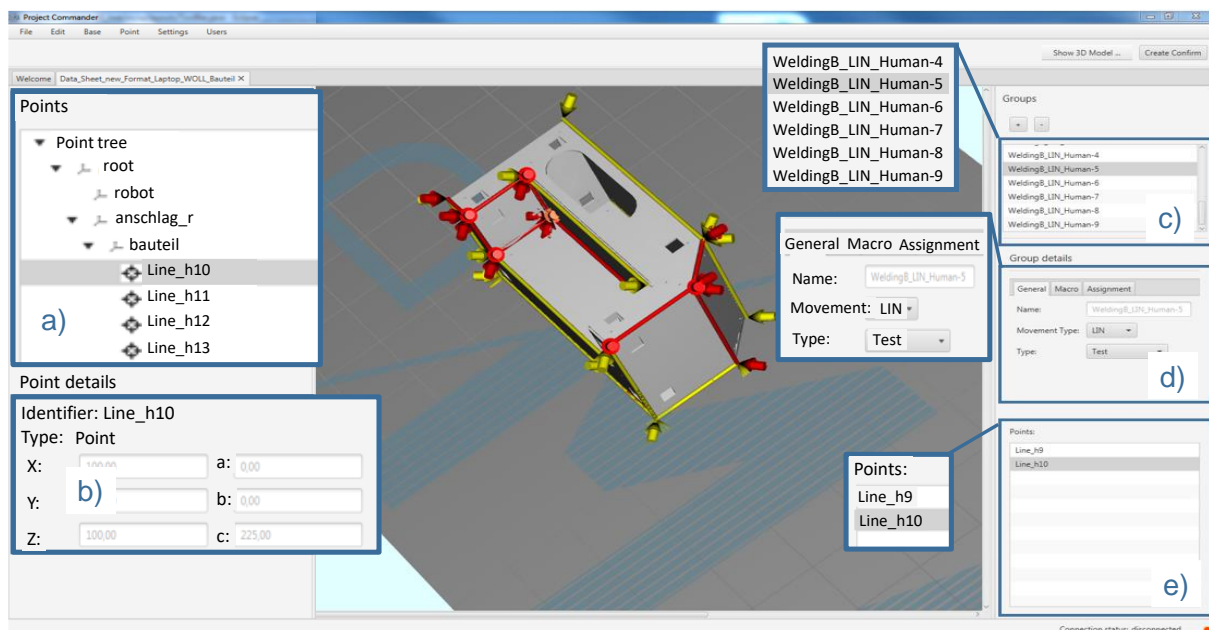
##### Benutzeroberfläche

Zur Visualisierung des virtuellen Modells am Bildschirm wird eine grafische Benutzeroberfläche genutzt (Abbildung 73). Im Zentrum wird hier ein dreidimensionales Modell der zu bearbeitenden Baugruppe angezeigt. Zusätzlich werden die Punkte des virtuellen Modells durch Pfeile dargestellt. Diese zeigen die Position des Punktes sowie die Orientierung des Werkzeugs in dem Punkt an. Punkte, die zu einer Gruppe gehören, werden durch Linien verbunden. Die Farbe der Punkte sowie der zugehörigen Verbindungslinien zeigt an, ob die jeweiligen Punkte durch den Roboter (gelb) oder den Menschen (rot) bearbeitet werden. Die Position einzelner

Punkte kann mit Hilfe einer Computermouse durch Verschieben verändert werden. Das Verschieben der Position ist mit der Visualisierung von Arbeitsschritten gekoppelt und kennzeichnet direkt an der Baugruppe die Anpassung oder Erweiterung von Arbeitsschritten, wie in Kapitel 4.1.4 beschrieben und in Abbildung 71 veranschaulicht.

In der linken Spalte des Fensters in Abbildung 73 a) werden die Punkte und Koordinatensysteme des virtuellen Modells hierarchisch in einer Baumstruktur dargestellt. Nach Auswählen eines Punktes werden detaillierte Informationen zu diesem angezeigt (Abbildung 73 b)). Hierzu zählen die Bezeichnung des Punktes sowie seine Position (x,y,z) und die Orientierung ( $a = \alpha$ ,  $b = \beta$ ,  $c = \gamma$ ) des Werkzeugs in diesem Punkt. Diese können durch Eingabe neuer Werte verändert werden.

In der rechten Spalte werden die Informationen zu den vorhandenen Gruppen dargestellt. In Abbildung 73 c) werden zunächst alle vorhandenen Gruppen aufgelistet. Durch einen Klick auf eine dieser Gruppen werden die Punkte, die dieser Gruppe angehören dargestellt (Abbildung 73 e)). Zusätzlich werden im Bereich **Group details** (Abbildung 73 d)) nähere Informationen zu der jeweiligen Gruppe angezeigt.



**Abbildung 73 Grafische Benutzeroberfläche für die Bearbeitung des virtuellen Modells**

Unter dem Reiter **General** des Menüpunktes Group details (Abbildung 74 links) können allgemeine Einstellungen der Gruppe vorgenommen werden. Hierzu zählen die Art der Bewegung des Roboters und des Prozesstyps (z.B. Schweißen etc.). Der Reiter **Macro** (Abbildung 74 Mitte) stellt Einstellmöglichkeiten zur Verwendung von Makros für die ausgewählte Gruppe bereit. Hier kann eingestellt werden, ob die Gruppe als Makro bearbeitet werden soll. Darunter kann ausgewählt werden, welches vom Roboter bereitgestellte Makro verwendet werden soll. Zusätzlich kann ausgewählt werden, ob eine Offline- bzw. Onlinemessung durchgeführt werden soll. Für

Offlinemessungen kann zusätzlich die Messmethode ausgewählt werden. Die Zuweisung der Gruppe an den Menschen bzw. den Roboter kann unter dem Reiter **Assignment** (Abbildung 74 rechts) vorgenommen werden.

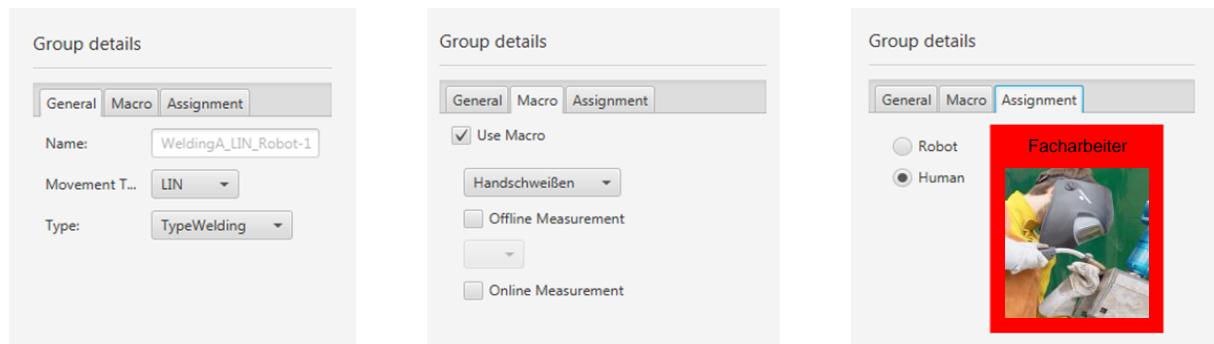


Abbildung 74 Beschreibung des Funktionsumfangs im Menüpunkt Group Details

## 4.2 Messkonzept im teilautomatisierten Arbeitsplatz

Das flexible Montagesystem muss an die jeweilige kundenspezifische Baugruppe angepasst werden und erfordert einfache Rekonfigurationsmöglichkeiten. Dabei werden die Arbeitsräume des Handhabungsgeräts und die Tätigkeiten des Werkers an die Montageoperation angepasst. Dies erfolgt in der Regel durch das Anpassen der Bezugskoordinaten bzw. durch das Positionieren des Robotersystems zur Montageoperation.

Des Weiteren kommt es zu prozessbezogenen Abweichungen im teilautomatisierten Arbeitsplatz. Dazu gehören unter anderem Toleranzabweichungen durch vorgelagerte Montage- und Fertigungsprozesse, aber auch Abweichungen während des eigentlichen Montageprozesses, z.B. durch eine sich ändernde Geometrie einer kundenspezifischen Baugruppe.

Diese Abweichungen erfordern eine dreistufige Messstrategie, die eine Einhaltung der spezifischen Prozessmerkmale in der Montage eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes sicherstellt.

Anhand des konkreten Beispiels für die kundenspezifische Montage von Schweißkonstruktionen wird die Vorgehensweise zur Entwicklung eines Messkonzeptes erarbeitet.

Das Messkonzept basiert auf einer robotergeführten Sensorik und steht fest in einer mathematischen Beziehung zum Roboterflansch. Im teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz wird ein Linientriangulationssensor verwendet, um die Abweichungen zu detektieren.

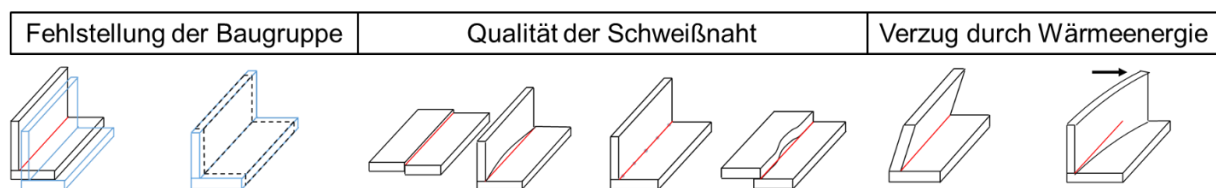
Dabei werden die Abweichungen eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes in drei Arten der Abweichungsform unterteilt und in Abbildung 75 veranschaulicht.



Liegt eine Fehlstellung der Baugruppe vor, beschreibt dies die Abweichungen aus der Planung des virtuellen Modells oder aus der Simulation zum realen Umfeld.

Kommt es zu Abweichungen der Schweißnaht, müssen diese erfasst werden, um die Prozessparameter anzupassen, da der Schweißprozess entsprechend einem idealen Volumen der Schweißnaht entwickelt wurde.

Außerdem entsteht durch und während des Schweißprozesses ein Wärmeverzug der Schweißkonstruktion. Auch diese Form der Abweichung muss das Messkonzept detektieren, um die geforderte Produktqualität der Schweißkonstruktion sicherstellen zu können.

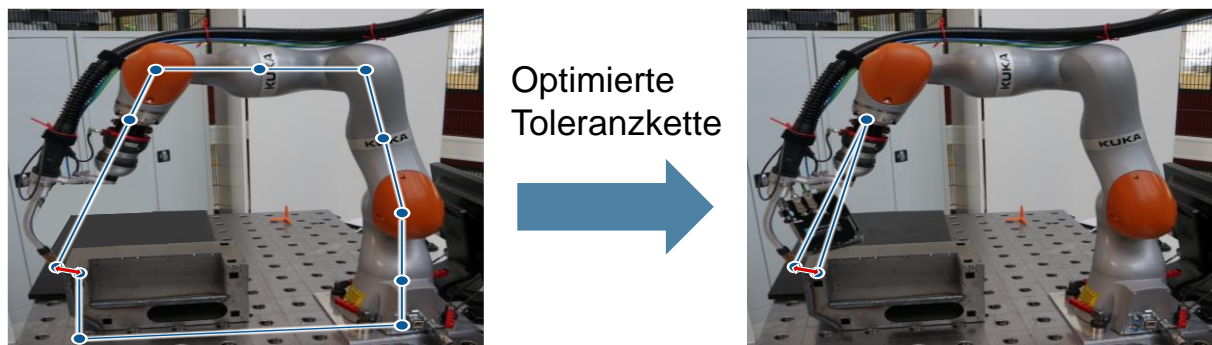


**Abbildung 75 Anforderung eines Messkonzepts zur Erkennung von Abweichungen bei der kundenspezifischen Montage von Schweißkonstruktionen**

Um die Prozesssicherheit in den automatisierten Montageprozessen zu gewährleisten, ist eine Identifikation der Bezugskoordinatensysteme während der Inbetriebnahme des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes erforderlich. Für die Einhaltung der Prozesstoleranzen ist die Anpassung der virtuellen Prozessparameter zur realen Baugruppe erforderlich, sowie ggf. eine Korrektur der Prozessbahn innerhalb des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes.

Um die relevanten Abweichungen im Montagesystem zu erfassen, basiert das entwickelte Messkonzept auf der Optimierung der Toleranzkette. Damit ist eine vollständige Identifikation aller Einflussgrößen für das Modell nicht erforderlich. Die Identifikation wird auf die wichtigsten Einflussgrößen zur Einhaltung der quantifizierbaren Merkmale reduziert. Schwerpunkt dieser Optimierung ist die Verringerung der relevanten Abweichungen im Montagesystem durch die Integration von Justagefunktionen und/oder der Integration von Messtechnik.

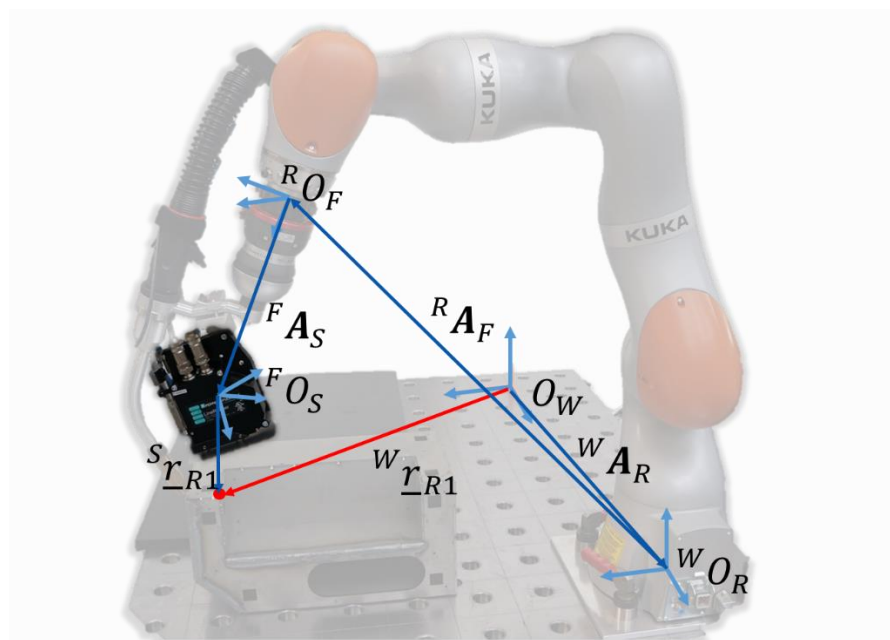
Zunächst wird die Toleranzkette aus allen vorhandenen Abweichungen gebildet. Die Abbildung 76 zeigt die vereinfachte Toleranzkette eines Robotersystems. Ohne Messtechnik werden alle Abweichungen für das Sicherstellen des quantifizierbaren Produktmerkmals aus einzelnen Gliedern zusammengesetzt.



**Abbildung 76** Auslegung einer Toleranzkette für die Einhaltung von quantifizierbaren Merkmalen am Produkt

Mit Messtechnik wird die Toleranzkette durch die Verwendung eines Messkonzepts mit angepasster Messtechnik erheblich reduziert.

Eingesetzt wird dabei ein Lasertriangulationssensor als ein optisches Messsystem für die Abstandsmessung. Die Funktionsweise basiert auf einer Winkelmessung innerhalb der projizierten Laserlinie und der Reflektion des Objekts, z.B. der Reflektion auf der Schweißkonstruktion zum Bildsensor des Linientriangulationssensors. Die Berechnung des Abstands erfolgt über eine trigonometrische Funktion. In Abbildung 77 ist der Linientriangulationssensor am Schweißbrenner montiert, der fest mit dem Roboterflansch verbunden ist.

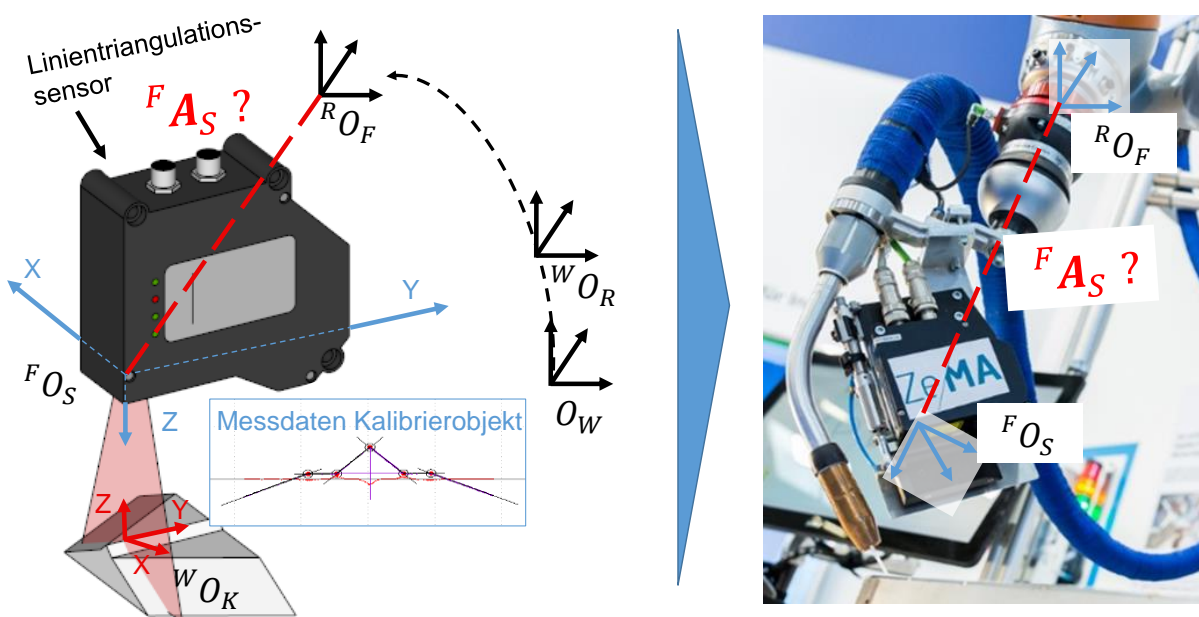


**Abbildung 77** Mathematische Beziehung des Triangulationssensors im Weltkoordinatensystem

Ein Sensormesspunkt wird über die Koordinatentransformationen vom Sensor über den Flansch und der Roboterbasis, absolut in den Weltkoordinaten, gemäß der Formel (4.15), beschrieben.

$${}^W \underline{r}_{R1} = {}^W \underline{A}_R * {}^R \underline{A}_F * {}^F \underline{A}_S * {}^S \underline{r}_{R1} \quad (4.15)$$

Um die Beziehung zwischen Roboterflansch und Sensorik herzustellen, ist ein Vermessen der Sensorik bzw. eine Kalibrierfahrt erforderlich. Das heißt, es gilt die Transformationsbeziehung, die sogenannte Abbildungsmatrix  ${}^F \underline{A}_S$ , zwischen dem Koordinatensystem des Sensors und dem Koordinatensystem des Roboterflansches zu bestimmen. Dies kann mithilfe eines Kalibrierobjektes (vgl. Abbildung 78) realisiert werden. Während der Kalibrierfahrt werden unterschiedliche Posen angefahren, d.h. es wird eine positive und negative Auslenkung der sechs Freiheitsgrade (x, y, z,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) erzeugt. Unter Verwendung der Posedaten des Roboters ( $X, Y, Z, \alpha, \beta, \gamma$ ) sowie der Messwerte des Sensors, welcher signifikante Merkmale wie Konturen und Ecken des Kalibrierobjektes detektiert, kann abschließend der TCP des Sensors vom System berechnet werden. Für die Berechnung der Transformationsparameter zwischen den zwei Koordinatensystemen Roboterflansch und Sensor stehen zugeschnittene Berechnungsverfahren zur Verfügung, die sich in der Regel in iterative und analytische Methoden unterteilen. Ist die Kalibrierung des Sensors abgeschlossen, können prozessspezifische Merkmale auf den Werkstücken detektiert und entsprechend zum Roboterflansch transformiert werden. [112]



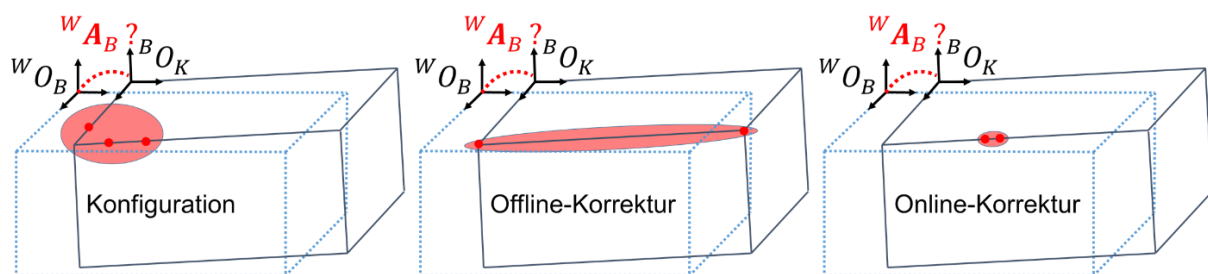
**Abbildung 78 Automatische TCP-Kalibrierung eines robotergeführten Linientriangulations-sensors [112]**

Das geforderte Messkonzept besteht aus einem dreistufigen Messkonzept und wird in das Konfigurations-Messverfahren, in das Offline-Messverfahren und in das Online-Messverfahren untergliedert.



Das dreistufige Verfahren wird individuell über einen modularen Systemansatz und ein Skalieren der Stufen an die Anforderungen des teilautomatisierten Roboterplatzes angepasst, um ein schnelles und einfaches Einmessen zu gewährleisten.

Jedes der Messverfahren nimmt eine Korrektur des Bezugskoordinatensystems vor, welches für die Anpassung der Bahnplanung verwendet wird. Die Korrektur wird je nach Verfahren an unterschiedlichen Prozessmerkmalen der Baugruppe ermittelt. Neben der Korrektur des Koordinatensystems erfolgt ein Abgleich und eine Anpassung der Prozessparameter. Im konkreten Fall der Schweißnaht ist eine Anpassung der Schweißnahtlänge und des Nahtvolumens gefordert. Die Abbildung 79 veranschaulicht das dreistufige Messverfahren mit der Korrektur des Bezugskoordinatensystems.



**Abbildung 79** Korrektur des Bezugskoordinatensystems mit dem dreistufigen Messkonzept

In den folgenden Unterkapiteln wird das dreistufige Messverfahren genauer erläutert.

#### 4.2.1 Einmessen der Bezugskordinaten innerhalb der Konfiguration

Nach dem Einrichten des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes ist die Wiederinbetriebnahme erforderlich. Dabei ist unter anderem das Identifizieren der Werkstücklage gefordert, was durch das Einmessen der Bezugskordinaten erfolgt.

Die virtuell geplante Konfiguration des Schweißarbeitsplatzes wird durch das Vermessen (vorgestellt in Kapitel 4.2) der realen Anordnung der Objekte mit ihren jeweiligen Koordinaten angepasst und dabei die Genauigkeit der Montageprozesse in dem teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz optimiert.

Um ein schnelles Einrichten der Zelle zu garantieren, werden die realen Bezugskordinatensysteme über die 3 Punkte-Methode bestimmt und im virtuellen Modell angepasst.

Zunächst ist das Erfassen der Punktmerkmale im Raum entscheidend. Dies kann durch verschiedene einfache Messmethoden erfolgen. Im konkreten Fall des Schweißarbeitsplatzes wird das Führen eines Handhabungsgeräts für das Erfassen der Positionen im Raum genutzt. Es können aber auch simulationsgestützte, automatisierte Einmessbewegungen eines Robotersystems genutzt werden, um die geforderten Punkte zu erfassen.

Entscheidend ist dabei jedoch immer, wie genau das virtuelle Modell mit einem vertretbaren Aufwand an die Realität angepasst werden kann, und ab wann das Erfassen von weiteren prozessrelevanten Einflussgrößen durch einen weiteren Messvorgang in der jeweiligen Montageoperation erforderlich ist.

### Bestimmen eines Koordinatensystems über die 3 Punkte-Methode

Die 3 Punkte-Methode beschreibt die Ermittlung eines Koordinatensystems anhand drei gemessener Punkte am Objekt, z.B. an der Schweißkonstruktion. Mittels Vektorrechnung und des Lösen von Geradengleichungen werden der Ursprung und die Orientierung des gesuchten Koordinatensystems bestimmt.

Die Abbildung 80 veranschaulicht das Bestimmen eines Bezugskoordinatensystems  ${}^W O_B$  über die 3 Punkt-Methode.

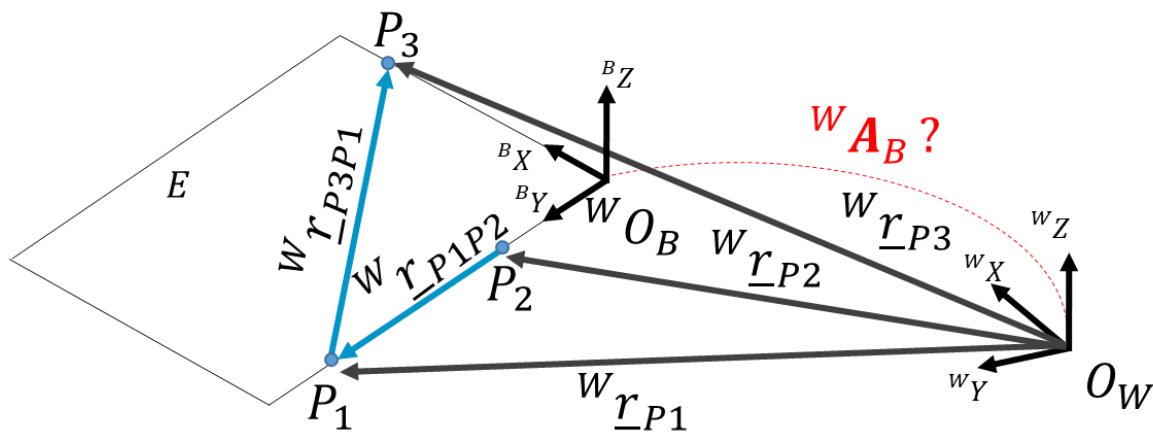


Abbildung 80 Skizze zur Bestimmung des Bezugskoordinatensystems mit drei Punkten [21]

Die 3 Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  können in diesem Fall über das Führen des Robotersystems und die anschließende Berechnung der kinematischen Kette im Weltkoordinatensystem  $O_W$  bestimmt werden.

Im ersten Schritt werden die Verbindungsvektoren  ${}^W \underline{r}_{P1P2}$  und  ${}^W \underline{r}_{P3P1}$  zwischen den Punkten auf der resultierenden Ebene aufgespannt und berechnet.

$${}^W \underline{r}_{P1P2} = {}^W \underline{r}_{P1} - {}^W \underline{r}_{P2} \quad (4.16)$$

$${}^W \underline{r}_{P3P1} = {}^W \underline{r}_{P3} - {}^W \underline{r}_{P1} \quad (4.17)$$

Durch die Verbindungsvektoren kann der Normalenvektor ermittelt werden. Er wird als Einheitsvektor  ${}^W \underline{e}_{Bz}$  beschrieben, welcher die z-Achse des Koordinatensystems definiert.

$${}^W \underline{e}_{Bz} = \frac{{}^W \underline{r}_{P1P2} \times {}^W \underline{r}_{P3P1}}{\| {}^W \underline{r}_{P1P2} \times {}^W \underline{r}_{P3P1} \|} \quad (4.18)$$

In diesem Fall definiert der normierte Verbindungsvektor  ${}^W\underline{e}_{B_Y}$  die y-Achse.

$${}^W\underline{e}_{B_Y} = \frac{{}^W\underline{r}_{P_1P_2}}{\|{}^W\underline{r}_{P_1P_2}\|} \quad (4.19)$$

Die fehlende Beschreibung der x-Achse kann durch das Kreuzprodukt der beiden Einheitsvektoren gebildet werden und wird als Einheitsvektor  ${}^W\underline{e}_{B_X}$  gekennzeichnet.

$${}^W\underline{e}_{B_X} = {}^W\underline{e}_{B_Y} \times {}^W\underline{e}_{B_Z} \quad (4.20)$$

Für die vollständige Beschreibung des Koordinatensystems ist neben der Rotation das Bestimmen des Ursprungs erforderlich. Dafür werden zunächst zwei Geraden  $g_{B_Y}$  und  $g_{B_X}$  auf den Kanten gebildet, die sich auf das Weltkoordinatensystem  $O_W$  beziehen.

$$g_{B_Y}: \begin{pmatrix} {}^W\underline{r}_{P_1x} \\ {}^W\underline{r}_{P_1y} \\ {}^W\underline{r}_{P_1z} \end{pmatrix} + \lambda_1 \begin{pmatrix} {}^W\underline{e}_{B_Yx} \\ {}^W\underline{e}_{B_Yy} \\ {}^W\underline{e}_{B_Yz} \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

$$g_{B_X}: \begin{pmatrix} {}^W\underline{r}_{P_3x} \\ {}^W\underline{r}_{P_3y} \\ {}^W\underline{r}_{P_3z} \end{pmatrix} + \lambda_2 \begin{pmatrix} {}^W\underline{e}_{B_Xx} \\ {}^W\underline{e}_{B_Xy} \\ {}^W\underline{e}_{B_Xz} \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

Die zwei Geraden werden gleichgesetzt, um damit den Schnittpunkt der sich kreuzenden Geraden auf der Ebene zu bestimmen. Die Gleichung kann wie folgt aufgestellt und gelöst werden:

$${}^W\underline{r}_{P_1} + \lambda_1 {}^W\underline{e}_{B_Y} = {}^W\underline{r}_{P_3} + \lambda_2 {}^W\underline{e}_{B_X} \quad (4.23)$$

$$\begin{pmatrix} {}^W\underline{r}_{P_1x} \\ {}^W\underline{r}_{P_1y} \\ {}^W\underline{r}_{P_1z} \end{pmatrix} + \lambda_1 \begin{pmatrix} {}^W\underline{e}_{B_Yx} \\ {}^W\underline{e}_{B_Yy} \\ {}^W\underline{e}_{B_Yz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} {}^W\underline{r}_{P_3x} \\ {}^W\underline{r}_{P_3y} \\ {}^W\underline{r}_{P_3z} \end{pmatrix} + \lambda_2 \begin{pmatrix} {}^W\underline{e}_{B_Xx} \\ {}^W\underline{e}_{B_Xy} \\ {}^W\underline{e}_{B_Xz} \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

Durch das Lösen des Gleichungssystems kann  $\lambda_1$  bestimmt werden.

$$\lambda_1 = \frac{({}^W\underline{r}_{P_1y} - {}^W\underline{r}_{P_3y}) * {}^W\underline{e}_{B_Xx} + ({}^W\underline{r}_{P_3x} - {}^W\underline{r}_{P_1x}) * {}^W\underline{e}_{B_Xy}}{({}^W\underline{e}_{B_Yx} * {}^W\underline{e}_{B_Xy}) - ({}^W\underline{e}_{B_Yy} * {}^W\underline{e}_{B_Xx})} \quad (4.25)$$

$$\lambda_1 = \frac{({}^W r_{P1z} - {}^W r_{P3z}) * {}^W e_{B_{Xy}} + ({}^W r_{P3y} - {}^W r_{P1y}) * {}^W e_{B_{Xz}}}{({}^W e_{B_{Yy}} * {}^W e_{B_{Xz}}) - ({}^W e_{B_{Yz}} * {}^W e_{B_{Xy}})} \quad (4.26)$$

Nachdem die Orientierung und der Ursprung des zu bestimmenden Bezugskoordinatensystems festliegen, kann dieses Koordinatensystem mit der homogenen Matrix  ${}^W A_B$  bestimmt werden (vgl. Abbildung 80).

$${}^W A_B = \begin{pmatrix} {}^W e_{B_{Xx}} & {}^W e_{B_{Yx}} & {}^W e_{B_{Zx}} & {}^W x_{oB,oW} \\ {}^W e_{B_{Xy}} & {}^W e_{B_{Yy}} & {}^W e_{B_{Zy}} & {}^W y_{oB,oW} \\ {}^W e_{B_{Xz}} & {}^W e_{B_{Yz}} & {}^W e_{B_{Zz}} & {}^W z_{oB,oW} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.27)$$

Nach der Aktualisierung des Koordinatensystems werden alle Montageprozesse durch das virtuelle Modell, in Bezug auf das Weltkoordinatensystem, angepasst.

In der Praxis ist die Zugänglichkeit des virtuellen Bezugskoordinatensystems nicht immer gewährleistet. Durch die absolute Beschreibung der Punkte im virtuellen Modell kann das Bezugskoordinatensystem auch hybrid aus einer Kombination von virtuellen Daten und realen Messpunkten eingemessen werden. Die Abbildung 81 veranschaulicht das hybride Vermessen des Koordinatensystems. In der links dargestellten Schweißkonstruktion liegt das Bezugskoordinatensystem auf der Tischebene und ist mit einem optischen Messsystem für das Erfassen der drei Punkte nicht zugänglich. Durch das hybride Bestimmen des Bezugskoordinatensystems werden die drei Punkte auf der Schweißkonstruktion gemessen. Die Verschiebung in Z-Richtung kann dabei durch einen virtuellen Offsetanteil bestimmt werden. Daraus lässt sich die homogene Abbildungsmatrix aus tatsächlichen Werten und virtuellen Werten bestimmen, siehe Abbildung 81.

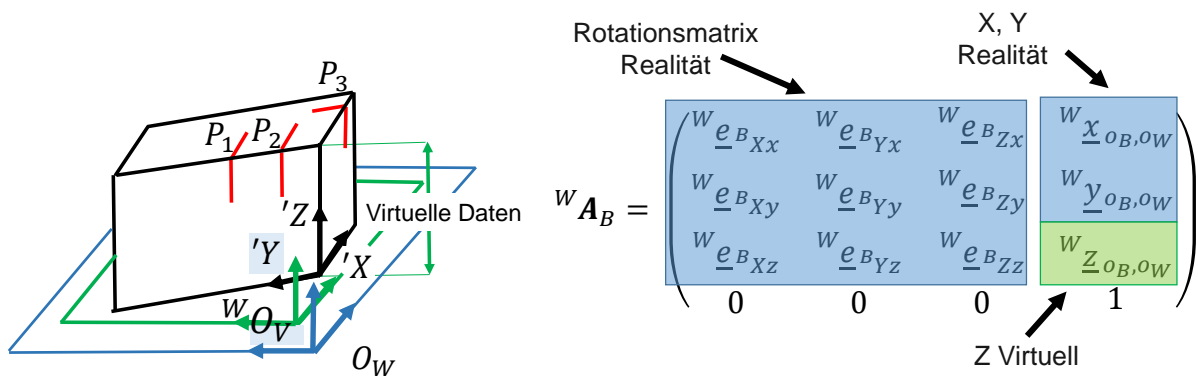


Abbildung 81 Hybrides Bestimmen des Bezugskoordinatensystems

### 4.2.2 Offline-Korrektur der Schweißnaht

Während der Montage und durch die Fertigungstoleranzen der Bauteile kann es zu unzulässigen Abweichungen an der jeweiligen Schweißnaht kommen. Diese Abweichungen müssen innerhalb der Montage für das prozesssichere Setzen einer Naht angepasst werden und können nicht durch die Identifikation des Bezugskoordinatensystems vernachlässigt werden.

Die Offline-Korrektur passt die Abweichungen für den jeweiligen Prozess innerhalb der Baugruppe an. Das Ziel der Offline-Korrektur ist es, die Start- und Endposition der Schweißnaht sowie die Längenänderung der Naht an die Realität anzupassen.

Die Offline-Korrektur setzt immer das Einmessen der Bezugskoordinaten voraus. Die grobe Planung der Schweißnaht basiert auf dem Datensatz des virtuellen Modells. Die vorliegenden Arbeitspunkte werden mittels Koordinatentransformationen in die entsprechenden Messposen überführt. Der robotergeführte Sensor, wie zuvor in Kapitel 4.2 beschrieben, wird grob zum tatsächlichen Nahtverlauf ausgerichtet. Das Messverfahren ermittelt die tatsächliche Start- und Endposition der Naht im Raum.

Die erfassten Abweichungen der Naht werden über eine Abbildungsmatrix bezüglich des Bezugskoordinatensystems und eines Skalierungsfaktors für die Längenänderung der Naht beschrieben. Der Skalierungsfaktor wird nach dem Setzen der Schweißnaht verworfen, da dieser Faktor bei weiteren Montageprozessen an der Baugruppe keine Relevanz aufzeigt. Die Abbildungsmatrix korrigiert das Bezugskoordinatensystem optimal zur tatsächlichen Schweißnaht und wird im virtuellen Modell für den nachfolgenden Schweißprozess genutzt, um ein konsistentes Ergebnis zu erzielen.

Dabei ist die präzise Erkennung von Linien und Punkten auf der Baugruppe ein Hauptbestandteil, wie in Abbildung 82 dargestellt.

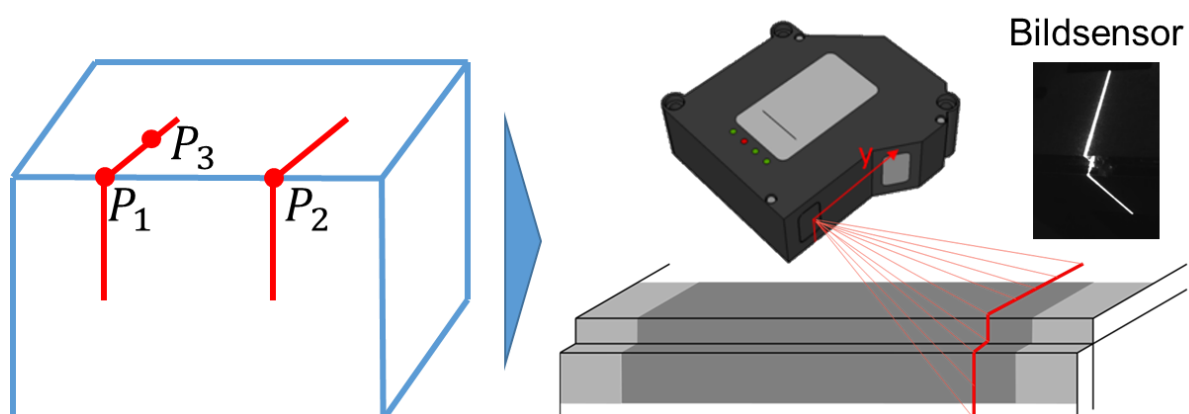


Abbildung 82 Erkennung von Linien und Punkten an der realen Baugruppe

Durch Einflüsse, wie Reflektionen, ist es jedoch nicht möglich, die Rohdaten des Sensors direkt zu verwenden. Hierzu werden die Datenpunkte zunächst einer entsprechenden Bauteilfläche zugeordnet. Die Punkte werden dazu mithilfe eines



Wie in Abbildung 84 gezeigt, entsprechen die gefundenen Geraden nicht den Bauteiloberflächen. Somit entspricht auch der gefundene Schnittpunkt  $S_{i\_grob}$  nicht dem eigentlichen Schnittpunkt der Bauteiloberflächen.

Die Ursache der Ungenauigkeiten lässt sich in Abbildung 84 erkennen: Zum einen sind die Datenpunkte an den Enden sehr gestreut und ungenau. Zum anderen verursachen die Datenpunkte in der Naht eine Gewichtung der Geraden, weg von der Bauteiloberfläche. Deshalb werden die beschriebenen Problembereiche zunächst unter Berücksichtigung des groben Schnittpunktes  $S_{i\_grob}$  maskiert (Abbildung 85).

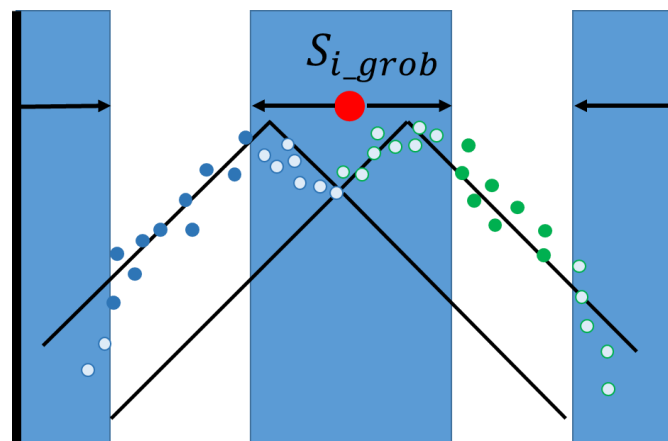


Abbildung 85 Maskierung der Messwerte zur Bestimmung des exakten Schnittpunktes

Anschließend werden nur unter Berücksichtigung der verbleibenden Punkte die Geraden bestimmt, die der Bauteiloberfläche entsprechen. Danach kann ein exakter Schnittpunkt  $S_i$ , der auf der entsprechenden Bahn liegt, bestimmt werden (Abbildung 86).

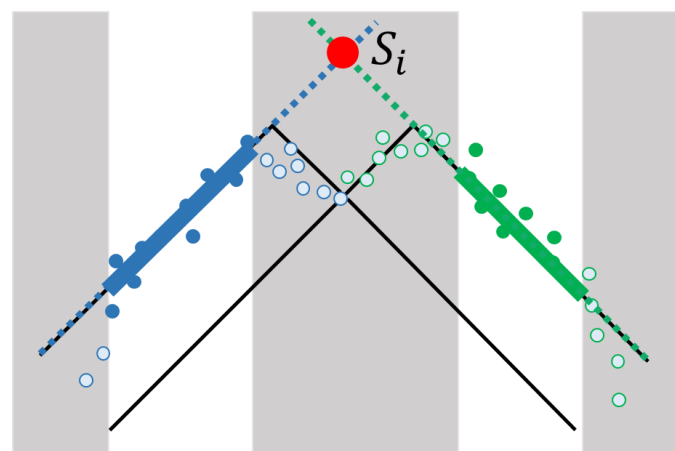


Abbildung 86 Bestimmen des exakten Schnittpunktes durch die Maskierung der Messdaten

Die so gefundenen Geraden können nun auch genutzt werden, um beliebige Punkte auf der Bauteiloberfläche entlang dieser zu extrahieren.

Im Folgenden wird das Bestimmen der Rotation, der Translation und der Längenänderung beschrieben.

### Rotation

Zur Bestimmung der Orientierung der realen Baugruppe werden zunächst durch einen Liniensensor die Punkte  $P_1, P_2, P_3$  ermittelt (siehe Abbildung 87). Diese werden relativ zum Anschlag der Baugruppe vermessen. Mithilfe dieser Punkte kann dann das Bezugskoordinatensystem  ${}^B O_K$ , welches in der Lage der zu bearbeitenden Linie orientiert ist, bestimmt werden.

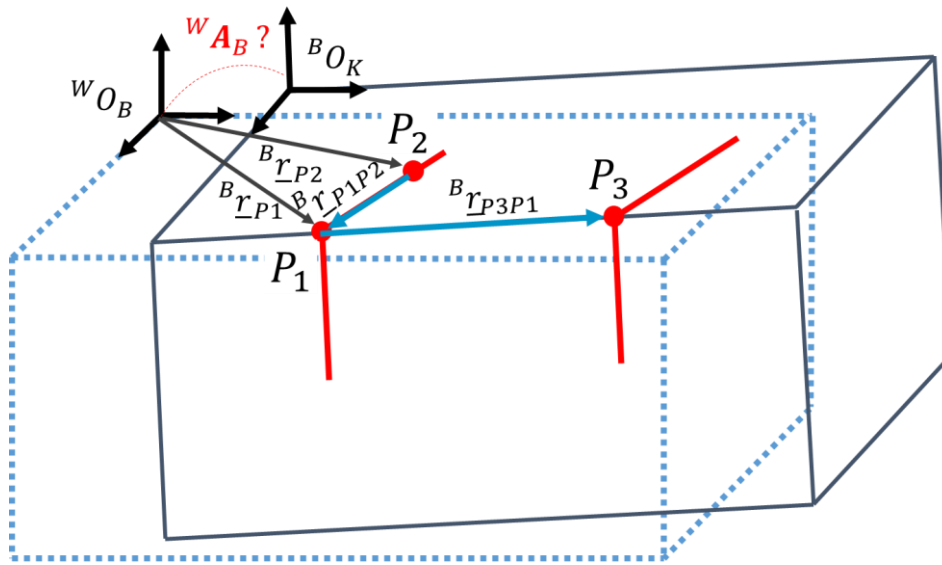


Abbildung 87 Bestimmen der Orientierung der Baugruppe durch die 3-Punkte Methode

Dazu werden zunächst die Verbindungsvektoren  ${}^B \underline{r}_{P_1 P_2}$  und  ${}^B \underline{r}_{P_3 P_1}$  bestimmt.

$${}^B \underline{r}_{P_1 P_2} = {}^B \underline{r}_{P_1} - {}^B \underline{r}_{P_2} \quad (4.28)$$

$${}^B \underline{r}_{P_3 P_1} = {}^B \underline{r}_{P_3} - {}^B \underline{r}_{P_1} \quad (4.29)$$

Der Vektor  ${}^B \underline{r}_{P_3 P_1}$  zeigt dabei in Richtung einer Koordinatenachse  ${}^K \underline{e}_2$ , dargestellt in Abbildung 88. Somit wird die Koordinatenachse, gemäß der Formel (4.30), beschrieben.

$${}^K \underline{e}_2 = \frac{{}^B \underline{r}_{P_3 P_1}}{|{}^B \underline{r}_{P_3 P_1}|} \quad (4.30)$$





## Translation

Um eine möglicherweise erforderliche Translation des (in Rotation korrigierten) Bezugskoordinatensystems zu ermitteln, wird eine zweite Messung mit korrigierter Rotation durchgeführt, entsprechend der Rotationsmatrix  $\mathbf{B}$  (4.33).

Hierzu wird ein Eckpunkt  $P_4$  der Baugruppe anhand einer Abrisskantenmessung ermittelt und als Vektor  ${}^B\underline{r}_{P4}$  bezeichnet. Die Abweichung zwischen dem Punkt  $P_{R1}$  des virtuellen Modells und dem gemessenen Punkt  $P_4$  wird durch den Verbindungsvektor  ${}^B\underline{r}_{P4R1}$  beschrieben. Bestimmt wird der Verbindungsvektor  ${}^B\underline{r}_{P4R1}$  mittels der Differenz des Vektors  ${}^B\underline{r}_{R1}$  zum Vektor  ${}^B\underline{r}_{P4}$ , gemäß der Formel (4.34).

$${}^B\underline{r}_{P4R1} = {}^B\underline{r}_{P4} - {}^B\underline{r}_{R1} \quad (4.34)$$

Anhand des bestimmten Verbindungsvektors  ${}^B\underline{r}_{P4R1}$  wird der Translationsvektor  $\underline{r}$  zwischen den Ursprüngen der Bezugskoordinatensysteme  ${}^W O_B$  und  ${}^B O_K$  bestimmt. Dabei dient der Verbindungsvektor  ${}^B\underline{r}_{P4R1}$  als Repräsentant des Ortsvektors  ${}^B\underline{r}_{O_K O_B}$ , welcher als Translationsvektor  $\underline{r}$  (4.35) in die Abbildungsmatrix  ${}^W A_B$  überführt wird.

$$\underline{r} = \left( {}^B\underline{r}_{P4R1x} \quad {}^B\underline{r}_{P4R1y} \quad {}^B\underline{r}_{P4R1z} \right)^T \quad (4.35)$$

Die gesuchte Abbildungsmatrix  ${}^W A_B$  für die Offline-Korrektur wird durch die ermittelte Rotationsmatrix und dem ermittelten Translationsvektor bestimmt, gemäß der Formel (4.36).

$${}^W A_B = \begin{pmatrix} \mathbf{B} & \underline{r} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.36)$$

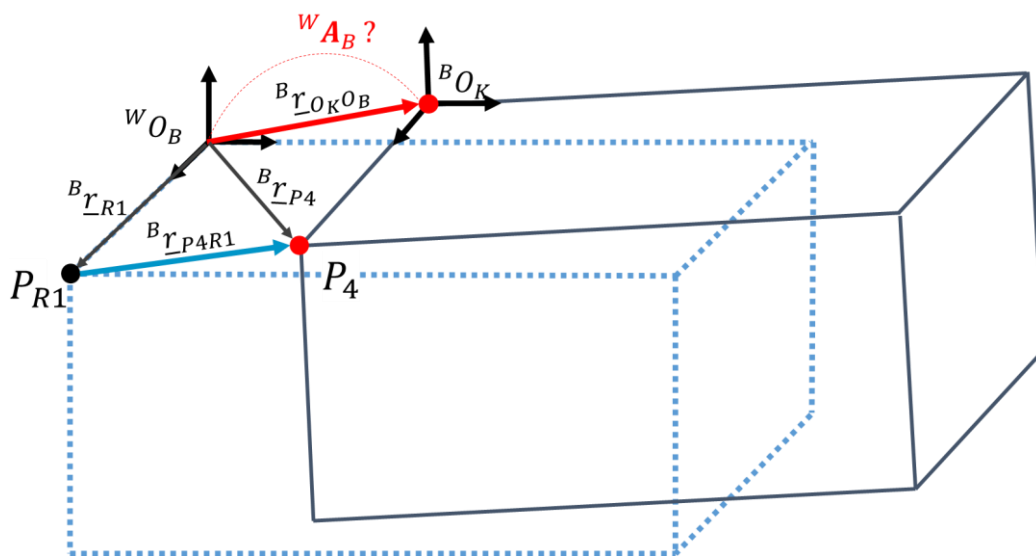


Abbildung 89 Bestimmung der Abweichung hinsichtlich der Translation zwischen virtueller und realer Baugruppe

## Längenbestimmung

Um eine mögliche Veränderung der Länge der Schweißnaht zu detektieren, dargestellt in Abbildung 90, wird der Endpunkt  $P_5$  der Schweißnaht ermittelt. Der gemessene Endpunkt  $P_5$  wird durch den Ortsvektor  ${}^K\underline{r}_{P5}$  im Offline-Korrektur Bezugskoordinatensystem  ${}^B O_K$  beschrieben. Die Abweichung der Schweißnahtlänge wird über den Verbindungsvektor  ${}^K\underline{r}_{P5R2}$  bestimmt und durch die Differenz des Vektors  ${}^K\underline{r}_{P5}$  zum Vektor  ${}^K\underline{r}_{R2}$ , gemäß der Formel (4.37), berechnet.

$${}^K\underline{r}_{P5R2} = {}^K\underline{r}_{P5} - {}^K\underline{r}_{R2} \quad (4.37)$$

Die Länge der realen Schweißnaht ergibt sich aus dem Verbindungsvektor  ${}^K\underline{r}_{P5R1}$  gemäß der Formel (4.38).

$${}^K\underline{r}_{P5R1} = {}^K\underline{r}_{P5} - {}^K\underline{r}_{R1} \quad (4.38)$$

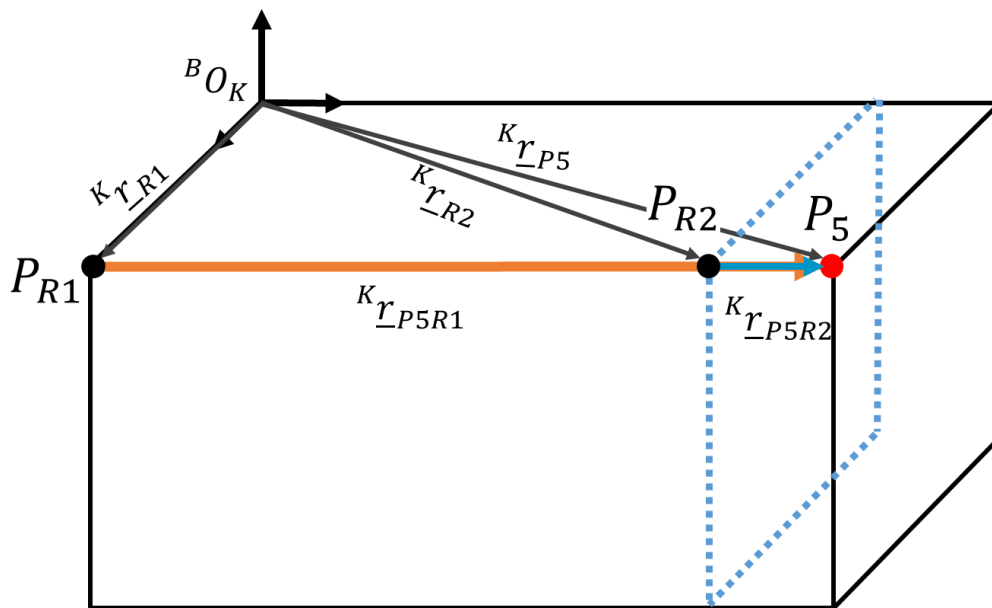
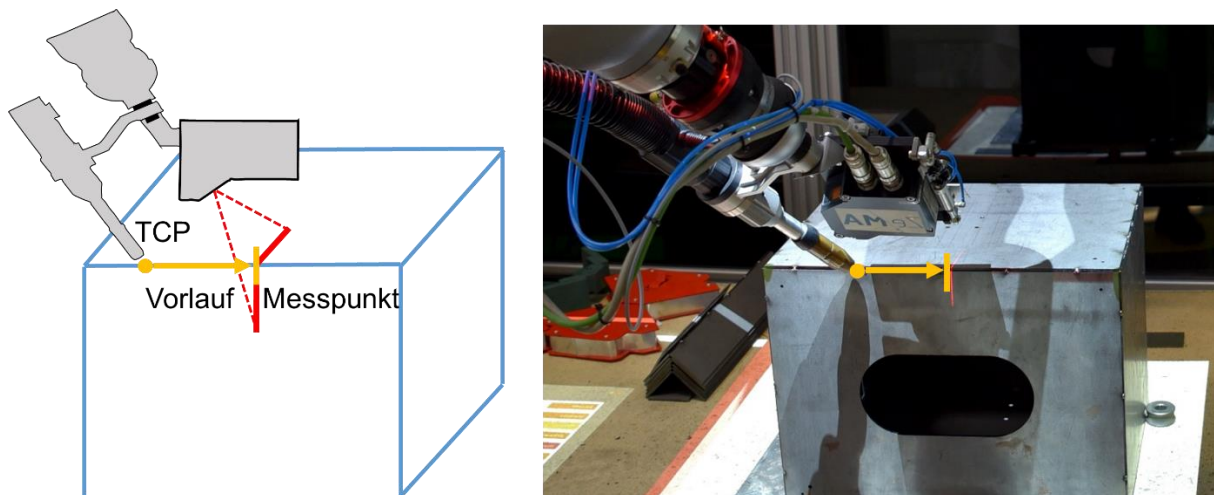


Abbildung 90 Ermitteln der Längenänderung der jeweiligen Schweißnaht

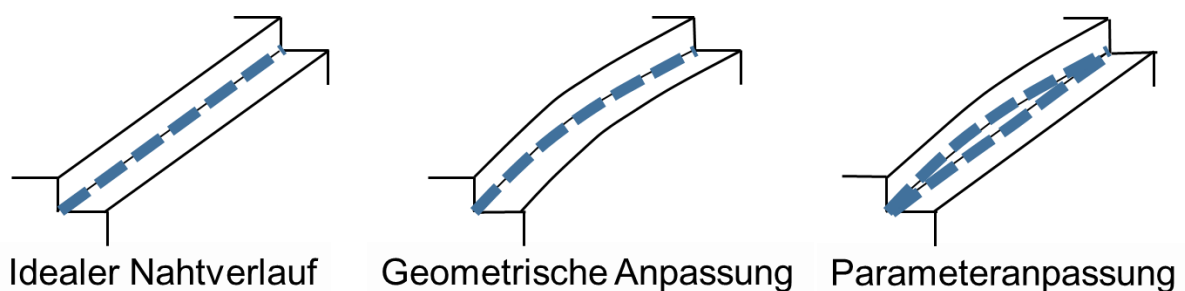
#### 4.2.3 Online-Korrektur der Schweißnaht

Die Online-Korrektur der Schweißnaht erfolgt wie in Abbildung 91 angedeutet. Dazu wird das Werkzeug so orientiert, dass zu jeder Zeit eine Messung des Pfades, der noch zu bearbeiten ist, mithilfe eines vorlaufenden Liniensensors durchgeführt werden kann.



**Abbildung 91** Orientierung des Prozesswerkzeugs während der Online-Korrektur der Schweißnaht

Die Abbildung 92 zeigt zwei mögliche Verformungen der markierten Naht aus Abbildung 91, die beispielsweise beim Schweißen durch Wärmeeintrag entstehen können. Abbildung 92 links zeigt die unveränderte Naht.



**Abbildung 92** Mögliche Verformung der Schweißnaht innerhalb der Online Korrektur

In der Mitte der Abbildung 92 wird eine Naht angedeutet, deren geplanter Pfad durch die Verformung nicht mehr dem tatsächlichen Pfad entspricht. Hier muss eine Bahnkorrektur vorgenommen werden. Die in Abbildung 92 rechts skizzierte Naht weist durch die Verformung eine Lücke auf. Hier müssen Prozessparameter angepasst werden, um mehr Material an der entsprechenden Stelle einzubringen.

### Geometrische Anpassung

Um eine geometrische Anpassung der Bahn vorzunehmen, werden, wie in Abbildung 93 angedeutet, in regelmäßigen Abständen Messungen durchgeführt. Pro Korrekturschritt werden je zwei konsekutive Messpunkte  $P_i, P_{i+1}$  benötigt. Dazu wird  $P_i$  als der zuvor gemessene Punkt gewählt und  $P_{i+1}$  als der gerade gemessene. Die Punkte  $P_i$  werden jeweils, wie in Abbildung 93 dargestellt, als Schnittpunkt der Vektoren  ${}^K\underline{r}_a$  und  ${}^K\underline{r}_b$  berechnet. Die Vektoren  ${}^K\underline{r}_a$  und  ${}^K\underline{r}_b$  stellen jeweils die Außenkanten des Bauteils dar, die auf dem Konturbild des Linienlasers detektiert werden.

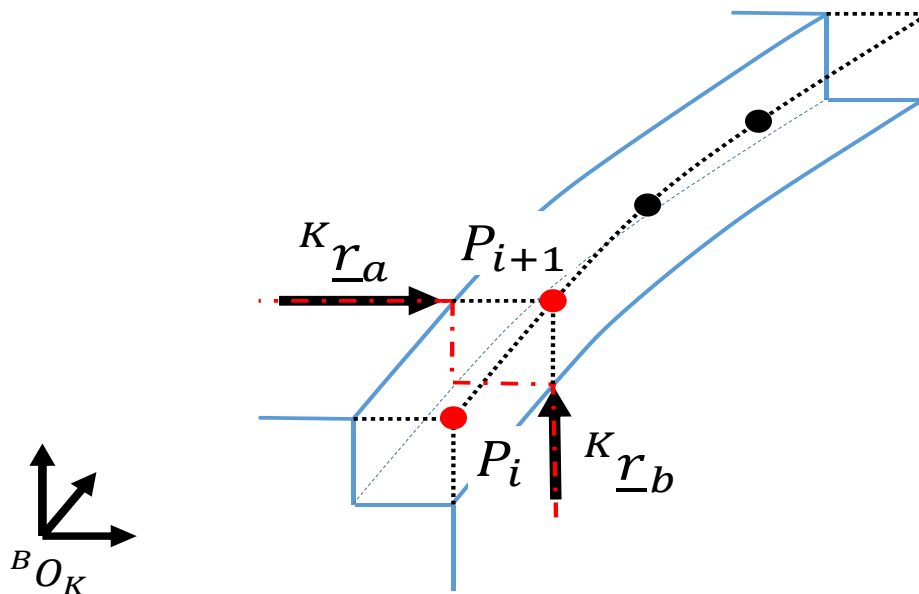


Abbildung 93 Vermessung der geometrischen Schweißnaht

Abbildung 94 veranschaulicht die Korrektur basierend auf den ersten beiden Messungen. Mithilfe von  $P_1$  und  $P_2$  und den resultierenden Vektoren  ${}^K\underline{r}_1$  und  ${}^K\underline{r}_2$  wird der Verbindungsvektor  ${}^K\underline{r}_{21}$  berechnet. Dieser stellt den Verlauf der realen Naht auf dem Teilabschnitt  $P_1P_2$  dar. Außerdem wird mithilfe der Punkte  $P'_1$  und  $P'_2$  und den ebenfalls resultierenden Vektoren  ${}^K\underline{r}'_1$  und  ${}^K\underline{r}'_2$ , die auf der geplanten Bahn liegen, der Verbindungsvektor  ${}^K\underline{r}'_{21}$  berechnet. Wie in Abschnitt 4.2.2 Offline-Korrektur der Schweißnaht - Rotation beschrieben, kann mithilfe der Vektoren  ${}^K\underline{r}_{21}$  und  ${}^K\underline{r}'_{21}$  eine Rotationsmatrix berechnet werden.

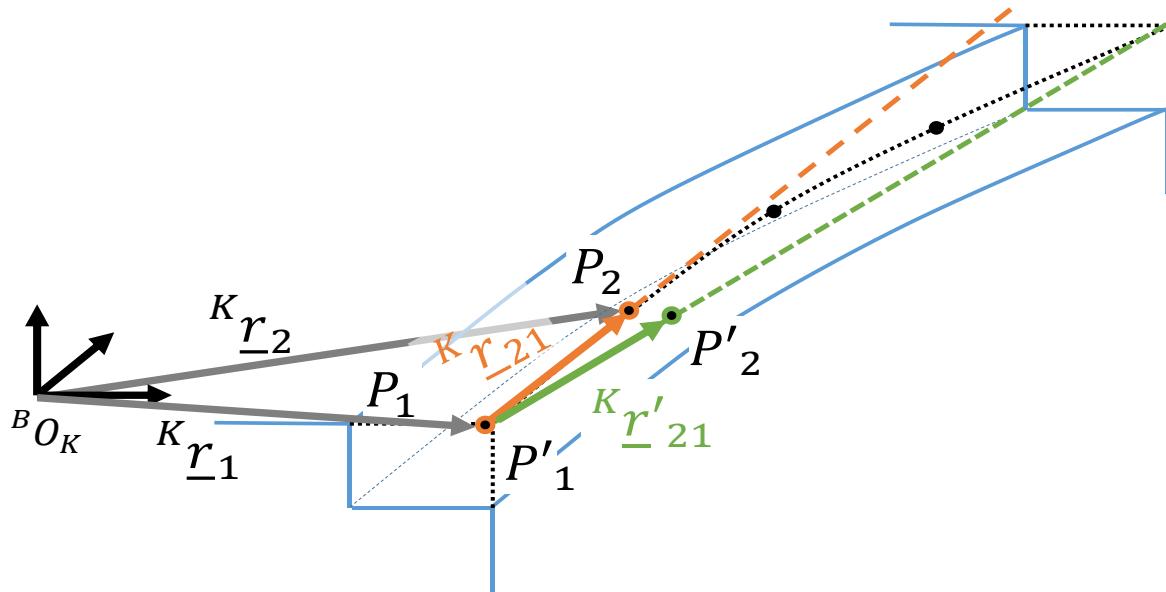


Abbildung 94 Korrektur der Schweißnaht basierend auf zwei Messpunkten

Mit dieser kann das Bauteilkoordinatensystem so rotiert werden, dass  $\underline{K\hat{r}}_{21}$  und  $\underline{K\hat{r}}'_{21}$  deckungsgleich sind. Dadurch liegen, zumindest für den Teilabschnitt  $P_1P_2$ , der reale und der geplante Pfad übereinander. Die resultierende angepasste Bahn ist in Abbildung 95 skizziert. Die Rotation des Bauteilkoordinatensystems wird nach einem Messvorgang direkt korrigiert.

Anschließend erfolgt die erneute Korrektur des Ergebnisses aus Schritt 1 (Abbildung 95), basierend auf den Punkten  $P_2, P_3$  bzw.  $P'_2, P'_3$ . Danach wird erneut das Bauteilkoordinatensystem so rotiert, dass der geplante und reale Pfad deckungsgleich werden.

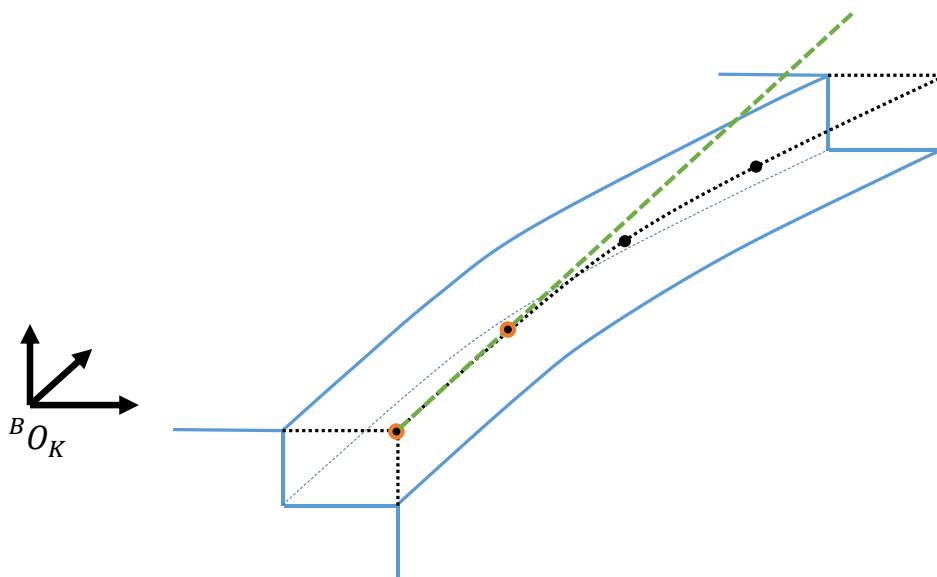


Abbildung 95 Resultierende angepasste Schweißnaht nach der geometrischen Online-Korrektur

Um sicherzustellen, dass nicht über die Naht hinaus geschweißt wird, wird zusätzlich am Ende des Pfades, je 5 mm vor und hinter sowie auf Höhe des geplanten Endpunktes, eine Messung durchgeführt ( $E_1, E_2, E_3$ ). Als Endpunkt der Bahn wird dann derjenige Punkt gewählt, der noch auf dem Bauteil liegt. Im Beispiel aus Abbildung 96 also  $E_2$ . Dies wird mittels vorlaufendem Sensor gemäß der Methode zur Längenbestimmung aus Kapitel 4.2.2 ermittelt.

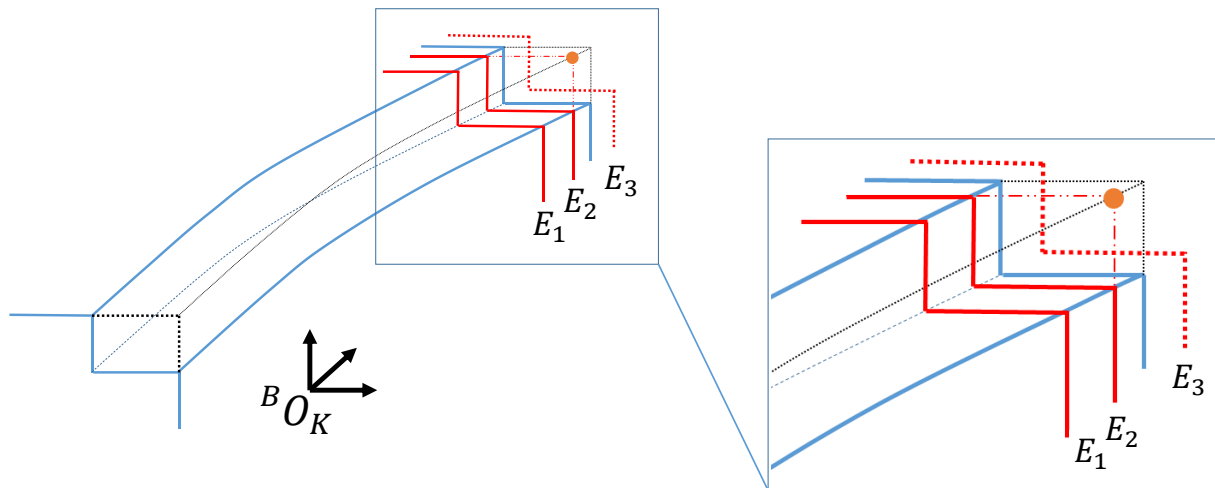
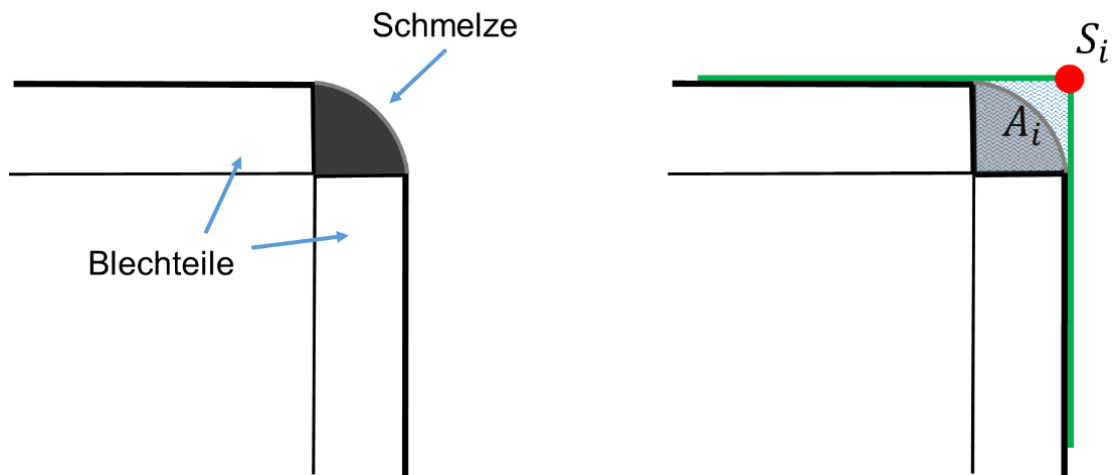


Abbildung 96 Vermessen der Längenänderung der Schweißnaht während der Online-Korrektur

### Parameteradaption

Die Parametrierung des Schweißnahtprofils erfolgt entsprechend der zu verbindenden Blechstärken und erfordert eine definierte Streckenenergie. Das Schweißnahtprofil wird individuell bei einer idealen Schweißnaht ausgelegt. Die Streckenenergie  $E$  setzt sich dabei aus der Lichtbogen Spannung  $U$ , aus dem Schweißstrom  $I$  und aus der Geschwindigkeit  $v$  des Schweißprozesses zusammen (4.39) [113]. Die Streckenenergie beeinflusst das Volumen der Schmelze im Querschnitt der Naht und beeinflusst somit das entstehende Schweißnahtprofil, gemäß der Abbildung 97 gekennzeichnet auf der linken Seite.

$$E = (U * I)/v \quad (4.39)$$



**Abbildung 97 Schweißnahtprofil**

Verformt sich die Baugruppe und es entsteht eine Lücke, so muss je nach Größe der Lücke mehr Material eingebracht werden, wie in Abbildung 92 rechts veranschaulicht. Dies erfordert die Anpassung der Streckenenergie um das Volumen der Schmelze gemäß des Schweißprozesses zu adaptieren. Das Volumen der Naht ist dabei proportional zur Fläche des Querschnitts der Naht und wird in der Online-Korrektur der Schweißnaht mit einem vorlaufenden Liniensensor (veranschaulicht in Abbildung 91) detektiert. Dabei wird der Schnittpunkt  $S_i$ , wie im Kapitel 4.2.2, ermittelt und die Fläche  $A_i$  aufgespannt (siehe Abbildung 97).

Die ideale Fläche  $A_i$  lässt sich aus der Blechstärke der zu fügenden Bauteile ermitteln und dient als Referenzfläche. Bei jeder Messung mit dem Liniensensor wird die reale Fläche  $A_i$  bestimmt. Dabei wird die Fläche  $A_i$  zwischen der Kontur der Baugruppe des Graphen  $g(x)$  und des Graphen  $f(x)$  per Integral berechnet. Hierzu wird zunächst der Schnittpunkt  $S_i$  der beiden Linien berechnet, die die Oberflächen der zu verschweißenden Bleche repräsentieren. Der Schnittpunkt  $S_i$  sowie die beiden Linien bilden den Graphen  $f(x)$ , gemäß der Abbildung 98.

Die Flächenberechnung mit Integral zwischen den Graphen erfolgt im Intervall  $[a; b]$  gemäß der Formel (4.40) und entspricht den Grenzen der inneren Maskierung zur Bestimmung des exakten Schnittpunkts  $S_i$ , veranschaulicht in Abbildung 85.

$$A_i = \left| \int_a^b (f(x) - g(x)) dx \right| \quad (4.40)$$



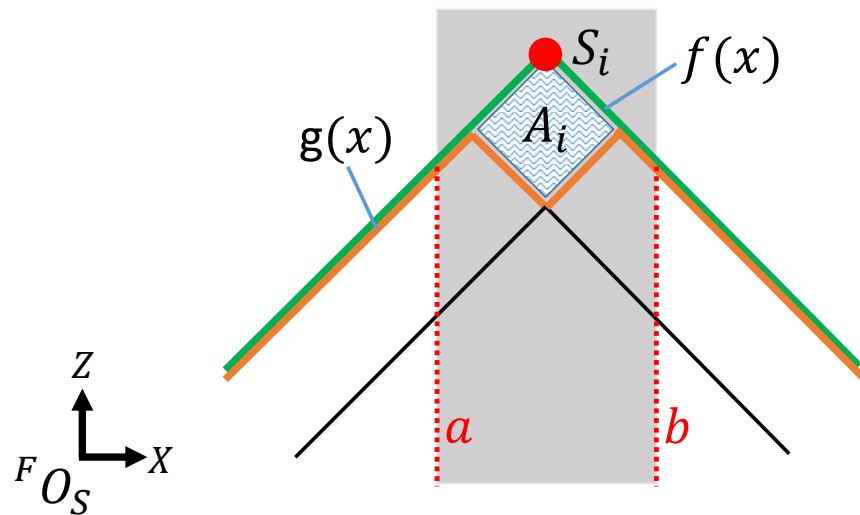


Abbildung 98 Berechnung der Volumenänderung einer Schweißnaht

Verformt sich die Baugruppe, so ändert sich die aufgespannte Fläche  $A_i$  während des Schweißprozesses. Über die Flächenänderung zur Referenzfläche wird proportional die Streckenenergie im Schweißprozess korrigiert. Damit können Parameter, die die Menge des eingebrachten Materials beeinflussen (z.B. die Robotergeschwindigkeit) in Abhängigkeit der berechneten Fläche  $A_i$  bestimmt werden. Die Berechnung des Flächeninhalts wird bei jeder Messung durchgeführt.



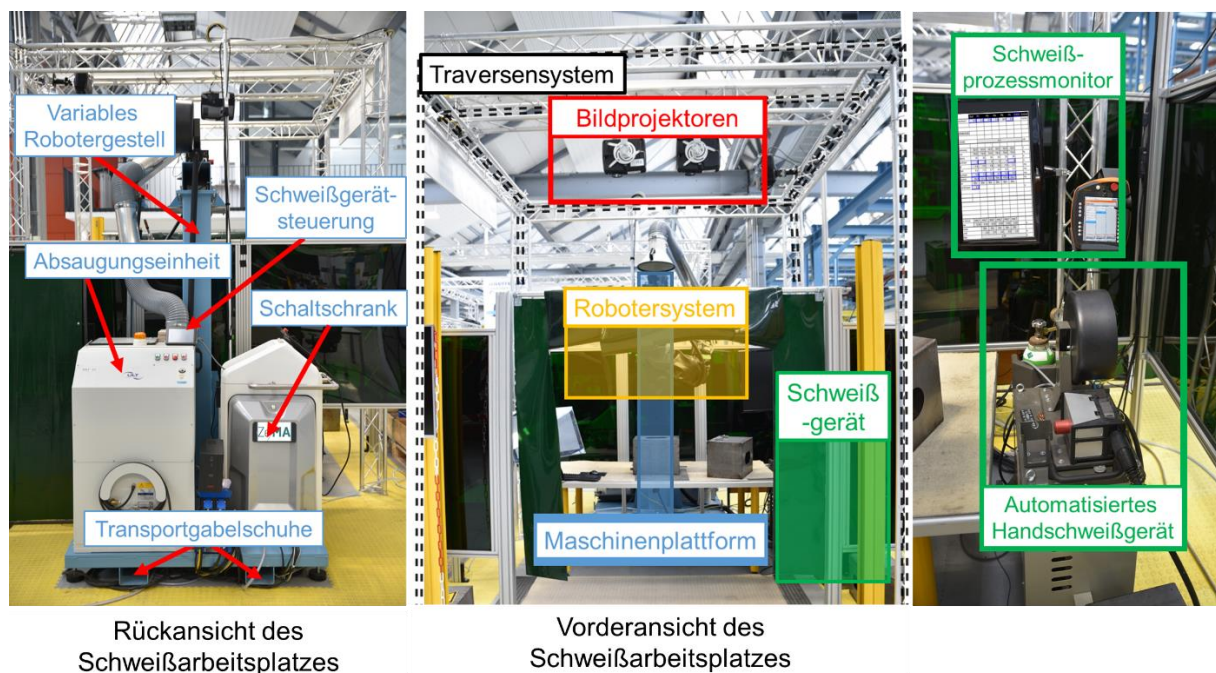
## 5 Validierung des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes

Im Rahmen dieser Arbeit ist eine Einrichtung für die Entwicklung eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes für die Montage von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen entstanden.

Anhand der Entwicklungsumgebung konnten die Funktionsweisen und die Forschungsergebnisse validiert werden. Darauf aufbauend wird neben der Beantwortung der Forschungsfragen für den Sondermaschinenbau auch die Übertragbarkeit des angepassten Steuerungskonzeptes in die Flugzeugbranche mit einer weiteren Entwicklungsumgebung gezeigt.

### Entwicklungsumgebung für die Montage von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen

Die am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) aufgebaute Entwicklungsumgebung ist in einer Übersicht in der Abbildung 99 dargestellt und besteht im Wesentlichen aus einer Maschinenplattform, dem Robotersystem, den Bildprojektoren und dem Schweißgerät.



**Abbildung 99** Entwicklungsumgebung für die Montage von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen

Die kompakte Maschinenplattform fungiert als variables Robotergestell und kann individuell an die Schweißapplikation angepasst werden. Mit einer standardisierten Stahlkonstruktion kann der Ausleger, in der Länge und in der Höhe, an den optimalen

Arbeitsraum angepasst werden. Die Grundplatte ist für den sicheren Transport mit Gabelschuhen ausgestattet und erleichtert somit das Einrichten und Positionieren der Maschinenplattform. Die Absaugung des Schweißschmauchs, die Schweißgerätesteuerung und der Schaltschrank des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes sind fest in einer kompakten Bauform auf der Grundplatte fixiert und bieten dem Facharbeiter eine gute Zugänglichkeit. Der Schaltschrank beinhaltet die sichere Netzeinspeisung, Geräteschutzeinrichtungen, einen Leitrechner und die Robotersteuerung mit entsprechenden Kommunikationsmodulen, z.B. das Feldbusmodul.

Das programmierbare Schweißgerät wird für das automatisierte Schweißen, aber auch für das handgeführte Schweißen genutzt. Das Ansteuern zwischen automatisiertem und handgeführtem Schweißen erfolgt durch zwei separate Drahtvorschubmodule. Dem Schweißfacharbeiter werden innerhalb der Montagezelle die aktuell verwendeten Schweißparameter per Monitor bereitgestellt.

Neben den Informationen der Schweißparameter ist die Entwicklungsumgebung mit Bildprojektoren ausgestattet, um den Schweißfacharbeiter während der Montage und beim Einrichten des Schweißarbeitsplatzes visuell zu unterstützen. Die Bildprojektoren sind in einer Überkopffosition des Schweißfacharbeiters, an einem leichten Traversensystem montiert und kalibriert.

Das Robotersystem kann am Robotergestell in einer stirnseitigen Position oder in einer Überkopffosition montiert werden und damit optimal an den Arbeitsraum der Schweißkonstruktion angepasst werden. Der Roboter ist mit einer selbst entwickelten Lederschutzhaube zum Schutz gegen sprühende Funken ausgestattet. Mit zusätzlichen Schutzvorkehrungen ist der Roboter gegen die elektromagnetischen Felder abgeschirmt, die beim Schweißen entstehen.

## **5.1 Funktionsweise**

Die Funktionsweise der Entwicklungsumgebung wird anhand des vorgestellten Steuerungskonzepts eines teilautomatisierten Montagesystems dargestellt.

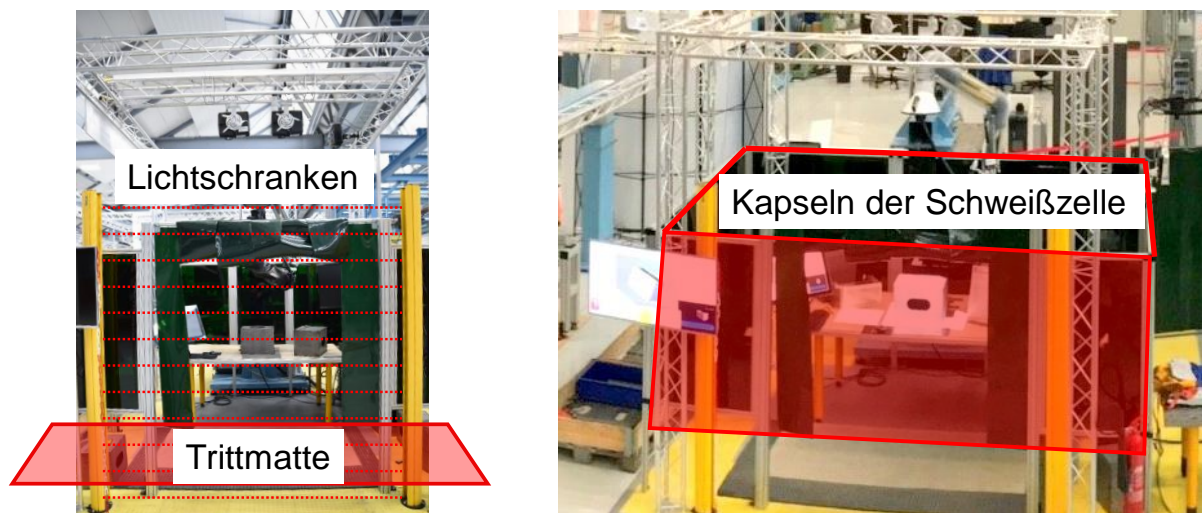
Der am ZeMA entwickelte Demonstrator zeigt die Umsetzung des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes für die Montage von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen.

### **Arbeitsplatzgestaltung und Sicherheit**

Der Schweißarbeitsplatz zeichnet sich durch die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter aus, die durch eine angepasste Arbeitsplatzgestaltung ermöglicht wird. Die Basis für die angepasste Arbeitsplatzgestaltung wird aus der fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung und der sicheren Gestaltung des Montagesystems abgeleitet. Die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter besteht aus einer Kombination verschiedener Arten der MRK.

Die Kombination verschiedener Arten der MRK ermöglicht den Aufenthalt des Schweißfacharbeiters in unmittelbarer Nähe des Roboters, ohne den Arbeitsplatz stillzusetzen. So können unter anderem das Einmessen von Bezugskoordinaten oder das Anpassen der Schweißnähte, aber auch das Parallelisieren von Arbeitsinhalten, im gleichen Arbeitsraum realisiert werden. Dabei behält der Mitarbeiter, ohne fundierte Kenntnisse der Robotik, stets die Kontrolle über das teilautomatisierte Montagesystem und kann bei Bedarf rechtzeitig eingreifen, um konsistente Schweißergebnisse zu erzielen. Während sich der Schweißfacharbeiter im Arbeitsraum des Robotersystems befindet, wird das teilautomatisierte Robotersystem in einem MRK-Betriebsmodus betrieben und entspricht der kooperierenden MRK. Durch den Einsatz verschiedener Sicherheitsprinzipien wie interne Sensorik, Prozessgestaltung und Design kann eine Gefährdung des Schweißfacharbeiters im kooperierenden Betrieb ausgeschlossen werden.

Basierend auf einer Risikobeurteilung kann die Gefährdung des Schweißfacharbeiters während des Setzens einer automatisierten Schweißnaht im überlappenden Arbeitsraum nicht vollkommen ausgeschlossen werden und erfordert den Einsatz zusätzlicher Sicherheitsprinzipien für die Überwachung der Arbeitsräume. In der Entwicklungsumgebung wurde eine Kombination aus sicherheitsgerichteten Trittmatten und Lichtschranken für die Überwachung des Arbeitsraums eingesetzt, siehe Abbildung 100.



**Abbildung 100 Sicherheitsprinzip in der Betriebsart automatisiertes Schweißen**

Eine wesentliche Gefährdung stellt im automatisierten Schweißprozess das automatische Zünden des Lichtbogens und das teilweise unkontrollierbare Sprühen von flüssiger Metallschmelze dar und erfordert einen Sicherheitsabstand zwischen Schweißprozess und Schweißfacharbeiter. Die gefährliche Strahlung des Lichtbogens wird durch die Kapselung des automatisierten Schweißprozesses erzielt.

Um die Arbeitsteilung zu optimieren, kann die Schweißzelle mit einer automatischen Schutztür ausgestattet werden, wodurch ein automatisches Starten des Schweißprozesses im teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz ermöglicht wird. Ist dies nicht der Fall, sieht die Norm eine eindeutige Freigabe durch den Schweißfacharbeiter vor, um diesen automatischen Prozess zu starten.

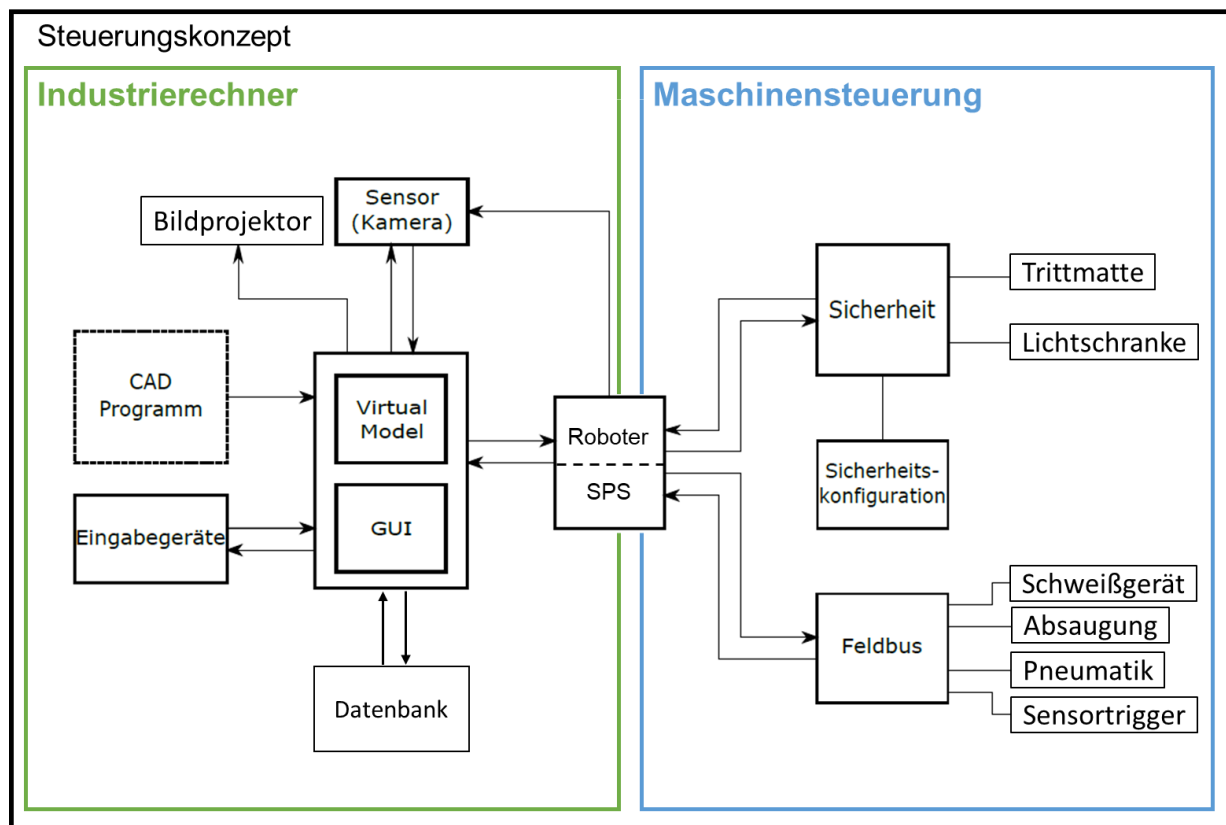
Neben der Gefährdung durch den Lichtbogen muss nach dem Fertigstellen der Schweißnaht das Prozesswerkzeug in kürzester Zeit abgekühlt werden, dazu wird das Prozesswerkzeug mit niedriger Druckluft ausgeblasen.

### **Steuerung und Bedienung**

Für die Integration der sicherheitsgerichteten Schutzelemente und allen weiteren mechatronischen Modulen besitzt die Entwicklungsumgebung ein Steuerungskonzept mit über- und untergeordneter Steuerung (Abbildung 101). Dabei unterteilt sich die Steuerung in eine industrierechnergestützte Applikationsumgebung und in die Maschinensteuerung. Der Industrierechner, in dem das Bedienkonzept und das Messkonzept als Leitreechner integriert sind, stellt den Austausch zur Maschinensteuerung her. Die Maschinensteuerung ermöglicht es, mit etablierten Industrieprotokollen, wie beispielsweise TCP-IP- und Feldbus-Protokollen, zu kommunizieren, aber gewährleistet auch eine normgerechte Integration der Sicherheitselemente. Die Schnittstelle zwischen Maschinensteuerung und Industrierechner übernimmt die Robotersteuerung. Dieses Konzept zeichnet sich besonders durch die umfangreiche Kommunikation in allen Steuerungsebenen aus und ermöglicht eine dezentrale Datenverarbeitung mit standardisierten Ein- und Ausgangsvariablen. Als standardisierte Datenstruktur fungiert unter anderem das virtuelle Modell des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes, welches sich auf einfachste Art und Weise durch das Tabellenkalkulationsprogramm „Microsoft Excel“ bearbeiten und erweitern lässt.

Für die Einhaltung der richtigen Schweißreihenfolge und das Wechselspiel zwischen Mensch und Roboter verwaltet das Steuerungskonzept (Abbildung 101) das automatisierte Schweißgerät, in dem je nach Montageaufgabe die richtigen Prozessdaten geladen und der automatische Schweißprozess oder der handgeführte Schweißprozess freigegeben wird.

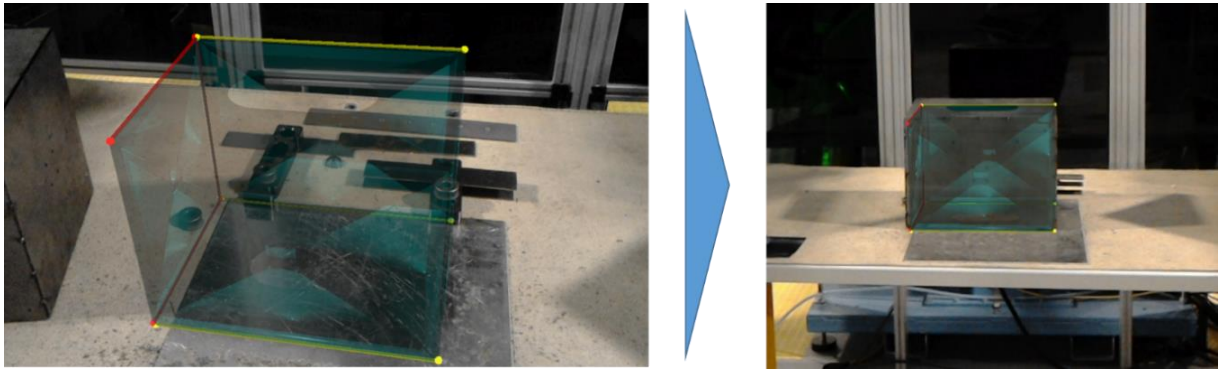
Das Bedienkonzept der Entwicklungsumgebung entspricht dem angepassten Steuerungskonzept und besteht aus der Kombination der grafischen Benutzeroberfläche und der visuellen Assistenz. Der Schweißfacharbeiter lädt die zu montierende Schweißkonstruktion über die grafische Benutzeroberfläche und startet den Montageprozess.



**Abbildung 101** Steuerungskonzept für die Integration der mechatronischen Module eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes

Die zu bearbeitende Baugruppe wird am Arbeitsplatz grob positioniert, dabei unterstützt die visuelle Assistenz den Schweißfacharbeiter. Neben den vorgestellten Bildprojektoren, die einen Bauteilanslag auf der Arbeitsfläche projizieren, kann dem Facharbeiter die Position der Baugruppe auch durch eine Brille dreidimensional visualisiert werden. Das in Abbildung 102 gezeigte Hologramm einer Schweißbaugruppe visualisiert dem Schweißfacharbeiter die Position und Orientierung der Schweißkonstruktion und veranschaulicht die ausstehenden Montageprozesse mit der farblichen Kennzeichnung der jeweiligen Aufgabenteilung. Auch hier gilt, die rot markierten Schweißnähte übernimmt der Schweißfacharbeiter und die gelben Schweißnähte das Robotersystem.





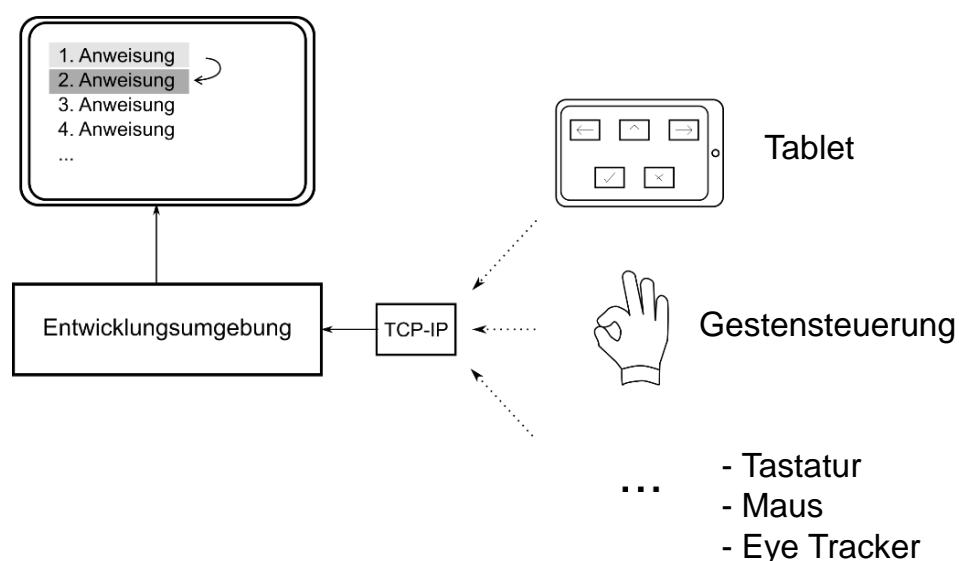
**Abbildung 102 Visuelle Assistenz am Schweißarbeitsplatz mittels dreidimensionaler Digitalbrille**

## Eingabegeräte

Um eine effiziente und intuitive Interaktion des Facharbeiters mit der Entwicklungsumgebung zu gewährleisten, stehen diesem an verschiedenen Aufgaben angepasste Eingabegeräte zur Verfügung.

Anpassungen am virtuellen Modell kann der Schweißfacharbeiter mittels Maus und Tastatur über die Benutzeroberfläche vornehmen. Die Nutzung von Maus und Tastatur erlaubt tiefgreifende Anpassungen, wie beispielsweise das Anpassen von Punkten im 3D-Anzeigemodus, das Gruppieren von Punkten zu neuen Arbeitsschritten und die Anpassung von Prozessparametern.

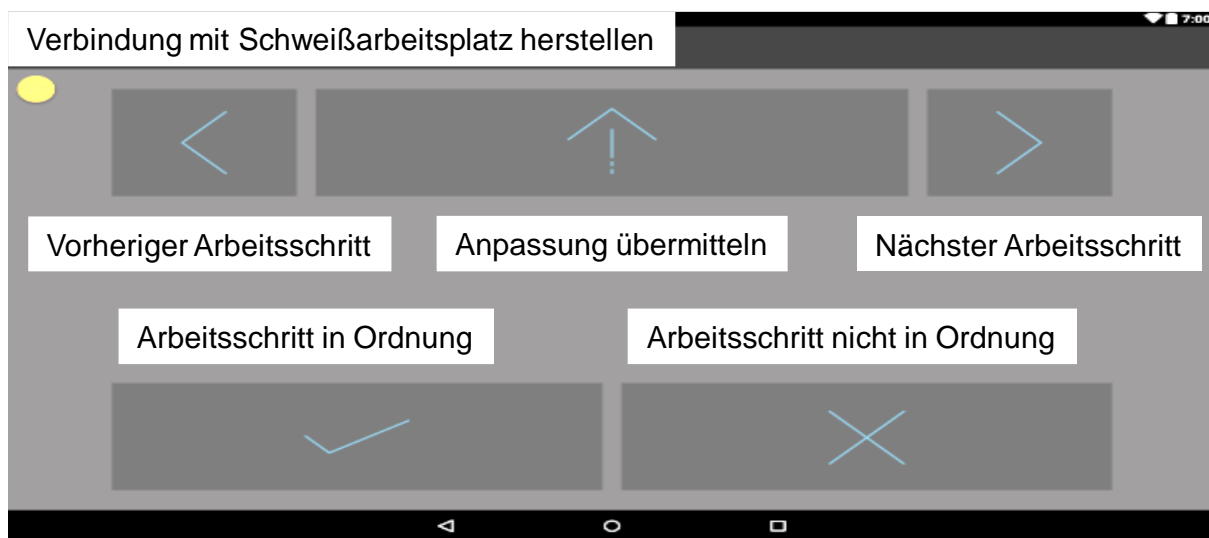
Die Interaktion des Facharbeiters mit der Entwicklungsumgebung während der Montage kann über weitere Eingabegeräte erfolgen. Hierzu stellt das Steuerungskonzept eine offene TCP-IP-Schnittstelle zur Verfügung, die die einfache Integration verschiedener Eingabegeräte erlaubt (Abbildung 103).



**Abbildung 103 Integration verschiedener Eingabegeräte mittels TCP-IP**



Diese ermöglicht die Navigation durch den Arbeitsplan, das Bestätigen bzw. Ablehnen von Aufforderungen durch das System sowie die Übermittlung von Befehlen an die Robotersteuerung zur Ausführung des aktuellen Arbeitsschrittes durch den Roboter. Des Weiteren können so verschiedene Eingabemethoden simultan bzw. im Wechsel genutzt werden, ohne dass diese vor der jeweiligen Benutzung explizit mit der Entwicklungsumgebung neu verbunden werden müssen. Am aufgebauten Demonstrator wurden damit verschiedene Geräte angebunden. Hierzu zählt unter anderem die Nutzung eines Tablets. Durch große Buttons einer entsprechenden App kann eine einfache und schnelle Touchscreen-basierte Interaktion erfolgen (Abbildung 104).

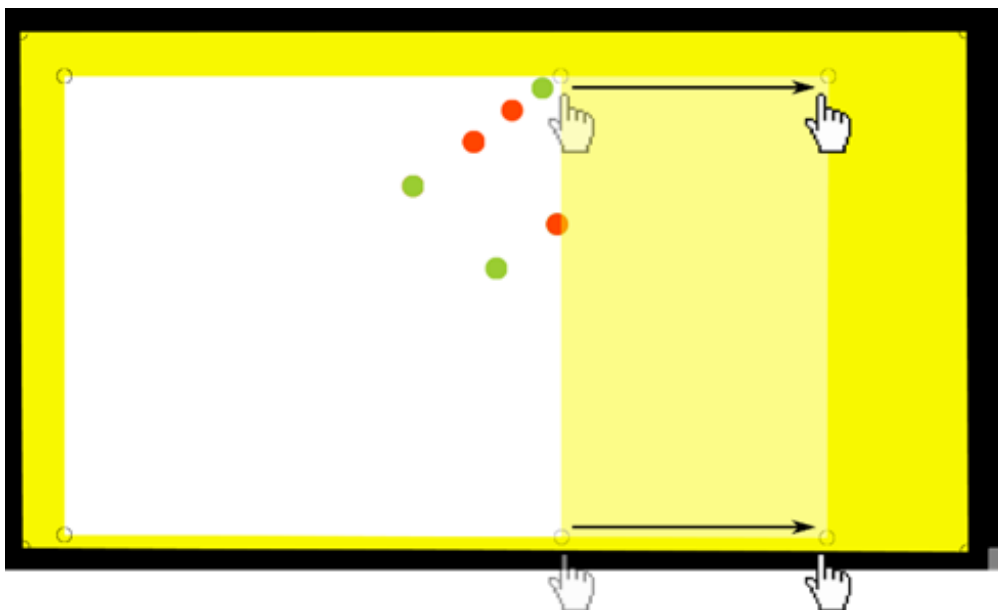


**Abbildung 104** Benutzeroberfläche der App zur Interaktion mit der Entwicklungsumgebung

Zusätzlich sind verschiedene Gestensensoren eingebunden. Diese erweisen sich dann als nützlich, wenn der Facharbeiter durch Schutzkleidung, wie beispielsweise Handschuhe, nur bedingt in der Lage ist, Maus, Tastatur oder einen Touchscreen zu bedienen. Die genutzten Sensoren vereinfachen dabei die Interaktion durch ihre jeweiligen Funktionsweisen und stellen eine intuitive Eingabe des Schweißarbeitsplatzes sicher. Mithilfe eines infraroten Stereokamerasystems werden die menschliche Hand und ihre Finger erfasst, wodurch eine Geste ermittelt werden kann. Die Geste wird als Eingabefunktion hinterlegt und ermöglicht somit eine kontaktlose Bedienung des Montagesystems. Für eine Nutzung des Sensors in einer Umgebung, in der eine bildbasierte Gestenerkennung nur bedingt möglich ist, wurde zudem die Gestensteuerung über Muskelaktivitäten am Arm erprobt und validiert. Dieser Sensor wird vom Schweißfacharbeiter am Unterarm getragen und wertet Befehle über Beschleunigungssensoren aus.

Um den Schweißfacharbeiter während des Montageprozesses optimal zu unterstützen, werden, wie oben beschrieben, Bildprojektoren eingesetzt. Die entsprechenden angezeigten Inhalte werden ebenfalls durch die Entwicklungsumgebung als Desktop-Fenster erzeugt. Diese lassen sich zusätzlich konfigurieren und bieten die im Folgenden beschriebenen Funktionen.

Eine der zusätzlichen Funktionalitäten sind Vorhänge, mithilfe derer Teile des Fensters maskiert werden können. Dies erlaubt zum einen den Informationsgehalt auf dem betrieblichen Hallenboden anzupassen, zum anderen können diese genutzt werden, um den Facharbeiter zusätzlich über den aktuellen Zustand der Anlage zu informieren. Somit können diese auch als präventives Sicherheitskonzept genutzt werden, indem sie in einer Signalfarbe anzeigen, wenn eine potentielle Gefahrensituation vorliegt oder erhöhte Vorsicht geboten werden muss. Die Position der Vorhänge sowie der zu maskierende Bereich können einfach per Drag & Drop angepasst werden. Dies erlaubt eine einfache und schnelle Einrichtung des Schweißarbeitsplatzes (Abbildung 105).



**Abbildung 105 Anpassung der Vorhänge zur Anpassung des Informationsgehalts auf dem betrieblichen Hallenboden**

Des Weiteren lassen sich alle Fenster, die zusätzlich angezeigt werden, frei positionieren, sodass der Arbeitsplatz schnell an neue Begebenheiten angepasst werden kann. Somit kann eine optimale Lesbarkeit sichergestellt werden (Abbildung 106).



Abbildung 106 Positionierung von Fenstern per Drag &amp; Drop

Außerdem lassen sich zusätzlich verschiedene Einstellungen zur Projektion vornehmen (Abbildung 107). Zunächst kann der Monitor bzw. Bildprojektor, auf dem die Visualisierung angezeigt werden soll, per Mausklick ausgewählt werden (Abbildung 107 a)). Für einen erhöhten Kontrast kann je nach Situation auch ein schwarzer Hintergrund angezeigt werden (Abbildung 107 b)). Zudem kann auch hier direkt eine Transformationsmatrix angegeben werden, die genutzt wird, um die Punkte auf die Baugruppe zu projizieren (Abbildung 107 c)). Zusätzlich können Punktgruppen von der Visualisierung ausgeschlossen werden (Abbildung 107 d)). Diese Option erweist sich dann als nützlich, wenn ein Bildprojektor nicht zum Visualisieren der Punkte genutzt werden soll oder wenn der ausgewählte Bildprojektor, aufgrund seiner Lage und Perspektive, Punkte nicht an alle Stellen der Baugruppe projizieren kann.

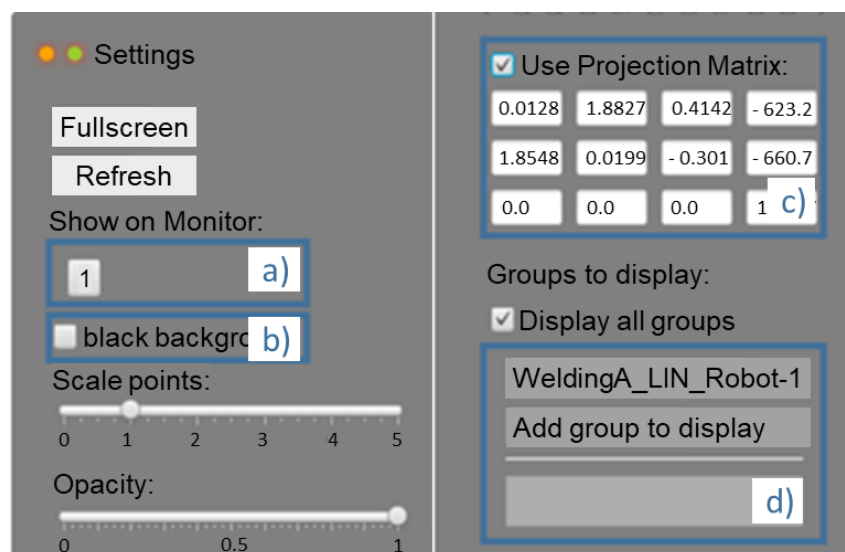


Abbildung 107 Einstellungsmöglichkeiten zur Konfiguration der Projektion

## Prozessentwicklung

Zur Validierung des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes wurden, unter Nutzung der vorgestellten Komponenten, auch automatisiert Schweißnähte an der Baugruppe durch das Robotersystem gesetzt. Hierzu wurde der Prozess an einer Referenznaht, veranschaulicht in Abbildung 108, parametrisiert, wodurch die verschiedenen Prozessparameter entwickelt wurden.



Abbildung 108 Referenznaht für das Parametrieren der Schweißnaht

Grundsätzlich wird jede Naht in drei Phasen gegliedert (Abbildung 109). Diese Einteilung in Phasen ist in der Robotersteuerung als Makro hinterlegt. Für jede dieser Phasen wird zusätzlich in der Schweißsteuerung ein Programm angelegt. Ein solches Programm enthält beispielsweise Prozessparameter, wie die Stromstärke, die verwendet wird oder die Pulsfrequenz. Im Makro der Robotersteuerung wird dann je nach Phase das entsprechende Programm der Schweißsteuerung ausgeführt.

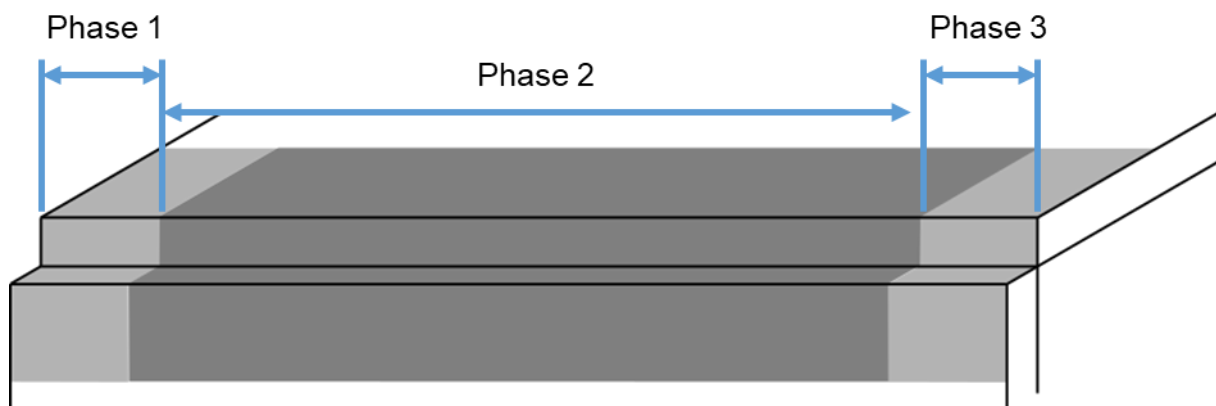


Abbildung 109 Einteilung der Naht in drei Phasen

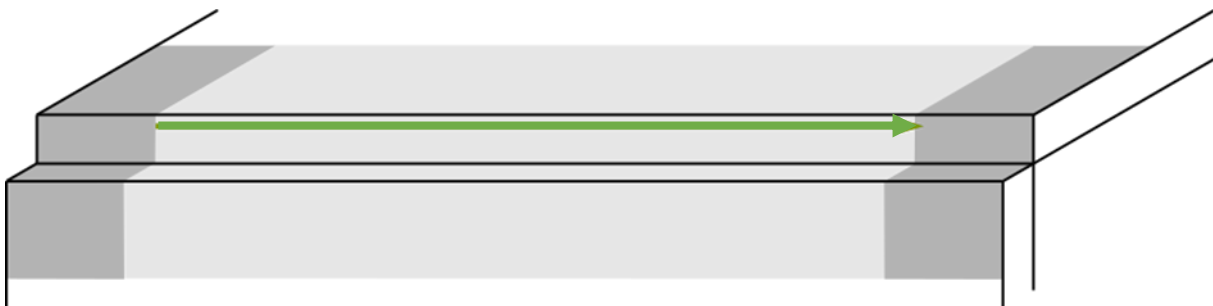
Die erste Phase beinhaltet das Einfädeln. Hierbei wird das Werkzeug zunächst mit einem leichten Versatz positioniert (Abbildung 110, roter Punkt).



**Abbildung 110 Vorgang des Einfädelns (Phase 1)**

Hier wird der Lichtbogen gezündet und das erste Programm, das auf der Schweißsteuerung hinterlegt ist, gestartet. Dann wird das Werkzeug zum Anfang der Naht bewegt und wieder zurück zum Startpunkt geführt. Sobald dieser erreicht ist, ist die Phase des Einfädelns beendet.

Danach wird durch das Makro das zweite Programm der Schweißsteuerung ausgewählt und das Werkzeug weiter entlang der Naht geführt (Abbildung 111). Hierbei wird zudem durch das Makro eine Pendelbewegung ausgeführt.



**Abbildung 111 Durchführung der Hauptnaht (Phase 2)**

Ist der Punkt, skizziert in Abbildung 112, erreicht, so wird das Programm zum Ausfädeln ausgeführt. Dabei wird das Werkzeug, wie in Abbildung 112 angedeutet, bewegt. Ist der markierte Punkt erreicht, so ist die Schweißnaht beendet.

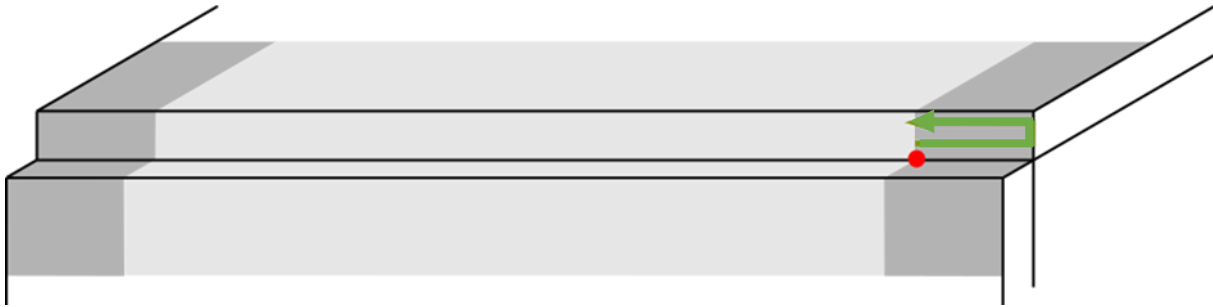


Abbildung 112 Vorgang des Ausfädelns (Phase 3)

Für jede der Phasen und deren Programme können alle Prozessparameter individuell eingestellt werden. Hierzu zählen unter anderem die Länge des Versatzes für Einfädeln und Ausfädeln, die Prozessgeschwindigkeit, Stromstärke, Pulsfrequenz, etc.

Zusätzlich zum eigentlichen Prozess können auch über die Benutzeroberfläche Messmethoden ausgewählt werden, die zur Korrektur des Koordinatensystems genutzt werden sollen. Auch hier können wiederum Parameter, wie z.B. die Abtastfrequenz des Sensors, eingestellt werden.

Während des gesamten Prozesses überwacht die Steuerung die Schweißparameter und dokumentiert diese, was unter anderem die Verbesserung des Prozesses unterstützt.

## 5.2 Beantwortung der Forschungsfrage

Zu Beginn der Arbeit wird der Bedarf für einen teilautomatisierten Arbeitsplatz in der Montage von kundenspezifischen Baugruppen aufgezeigt und der zentrale Forschungsauftrag für die **„Entwicklung eines teilautomatisierten Montagesystems für die Montage von kundenspezifischen Baugruppen durch die Mensch-Roboter-Kooperation“** abgeleitet.

Der Anwender im Sondermaschinenbau möchte die Vorteile der manuellen und der automatisierten Schweißprozesse kombinieren, um eine hohe Effizienz in der Montage von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen zu erzielen. Durch eine bedarfsgerechte Automatisierung für das Schweißen der individuellen Baugruppen muss die Reproduzierbarkeit der Qualität der zu montierenden Schweißkonstruktionen sichergestellt werden. Dabei muss die Prozessentwicklung der kundenspezifischen Schweißkonstruktion ohne die bisherigen hohen Investitionen in Probeschweißkonstruktionen und ohne die hohen Stillstandzeiten während der Entwicklung der Schweißparameter erfolgen. Für einen wirtschaftlichen Einsatz des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes müssen die Durchführung der Inbetriebnahmen und die Anpassungen des roboterbasierten Schweißarbeitsplatzes ohne das Expertenwissen im Bereich der Robotertechnologie möglich sein.

Die in der vorliegenden Arbeit aufgestellte These, dass ein teilautomatisierter Schweißarbeitsplatz für eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter

geeignet ist, wurde durch die Entwicklungsumgebung nachgewiesen und bestätigt. Das wesentliche Element der Arbeit war die Entwicklung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes, welcher das angepasste Steuerungskonzept für die intuitive Prozessentwicklung und Prozessführung mit der Gestaltung eines Bedienkonzeptes und die entwickelte Messstrategie für teilautomatisierte Montagesysteme beinhaltet. Die Entwicklung des teilautomatisierten Arbeitsplatzes wurde in dieser Arbeit ausführlich beschrieben.

Es wurde aufgezeigt, dass die Analyse der Produktionsabläufe im Sondermaschinenbau, mit ihren Montageoperationen in der Endmontage einer Schweißkonstruktion, die Basis für die effiziente Gestaltung eines Schweißarbeitsplatzes legt und den Bedürfnissen eines Sondermaschinenbaus entsprechen. Aus quantifizierbaren Qualitätsmerkmalen wird die fähigkeitsbasierte Aufteilung der Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter ermittelt. Die Aufteilung der Arbeitsinhalte im Schweißarbeitsplatz wird durch die Entwicklung des teilautomatisierten Montagesystems für die kundenspezifischen Schweißkonstruktionen bereitgestellt. Im Vergleich zu bisherigen Steuerungskonzepten werden in dem vorliegenden Steuerungskonzept nicht nur die automatisierten Schweißprozesse abgebildet, sondern auch die manuellen Schweißprozesse, was zu einer ganzheitlichen Beschreibung der Endmontage führt und eine hohe Flexibilität in der kundenspezifischen Montage ermöglicht. Die zentralen Elemente des teilautomatisierten Steuerungskonzepts für die MRK zeigen eine bedarfsgerechte Automatisierung für den Sondermaschinenbau auf.

Die Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter werden durch die Arbeitsplatzgestaltung effizient im Schweißarbeitsplatz aufgeteilt. Die sichere Zusammenarbeit wird durch den Leitfaden einer sicheren Arbeitsplatzgestaltung eines teilautomatisierten Montagesystems bereitgestellt und exemplarisch in der Entwicklungsumgebung umgesetzt.

Das entwickelte angepasste Steuerungskonzept für die intuitive Prozessentwicklung und Prozessführung zeichnet sich durch die effiziente Steuerung und Programmierung des Schweißarbeitsplatzes aus. Der Schweißarbeitsplatz lässt sich dank seines Bedienkonzeptes und der Messstrategie schnell und einfach an die Anforderungen innerhalb der Montage von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen anpassen und in Betrieb nehmen. Die Erweiterung des Steuerungskonzepts mit zusätzlichen mechatronischen Modulen ist durch die Beschreibung der standardisierten Kommunikationsprotokolle unabhängig von jedem Herstellerprotokoll und ermöglicht die anforderungsgerechte Auswahl der Betriebsmittel. Mit geringem Kostenaufwand können jegliche Sensoren und/oder Aktoren im Schweißarbeitsplatz, unter den Randbedingungen eines wandlungsfähigen Montagesystems, implementiert werden.

Der Schweißfacharbeiter wird bei der Prozessentwicklung und Prozessführung durch individuelle Assistenzfunktionen intuitiv unterstützt. Die Prozessentwicklung ist auf die Schweißparameter zugeschnitten und ermöglicht somit den erfahrenen Experten, die

Schweißprozesse zu führen und zu optimieren. Im Gegensatz zu den bisher entwickelten automatisierten Schweißprozessen wird das Roboterprogramm aus den Schweißparametern abgeleitet und als ein Schweißprozessmakro im teilautomatisierten Schweißarbeitsplatz hinterlegt. Steht beispielsweise das Ein- und Ausfädeln sowie der Nahtverlauf einer automatisierten Schweißnaht, so ist das angepasste Steuerungskonzept in der Lage, eine reproduzierbare Schweißnaht mit der geforderten Qualität an verschiedenen Nähten der Schweißkonstruktion zu setzen. Die Entwicklung des Schweißprozesses muss nicht an der Schweißkonstruktion selbst erfolgen, sondern kann auch an Musternähten zertifiziert werden, da sich die quantifizierbaren Merkmale des Prozesses durch die entwickelte Messstrategie nicht verändern. Damit erfüllt das angepasste Steuerungskonzept für die intuitive Prozessentwicklung und Prozessführung die Bedürfnisse eines KMU im Sondermaschinenbau.

Das hier vorliegende Bedienkonzept, mit der Systematik zur Gestaltung eines Bedienkonzeptes für ein teilautomatisiertes Montagesystem, ist der entscheidende Baustein zur effizienten Nutzung des Schweißarbeitsplatzes. Ein wesentlicher Bestandteil ist das zugeschnittene virtuelle Modell, welches auf einfache Weise durch den Mitarbeiter angepasst werden kann und somit eine schnelle Reaktionsfähigkeit innerhalb der Endmontage gewährleistet. Die Planung der Montageumfänge wurde bislang mit simulationsbasierten Roboterschweißprogrammen erstellt und durch geschultes Personal auf das Montagesystem übertragen. Durch die individuellen Software-Erweiterungen von vorhandenen CAD-Programmen erfolgt die Planung des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes während des Produktentstehungsprozesses. Die Erweiterung der Funktionalität der CAD-Programme erfolgt durch bekannte Softwarewerkzeuge und erfordert keine Personalschulungen.

Die Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter wird vollständig im Bedienkonzept erfasst und ermöglicht im Vergleich zu bisherigen Bedienkonzepten eine Zuweisung der Arbeitsinhalte. Damit lassen sich die Arbeitsinhalte flexibel über den kompletten Produktentstehungsprozess aufteilen.

Dank des Bedienkonzept ist eine fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter gegeben und ermöglicht eine dynamische Aufgabenteilung der Schweißnähte gemäß der geforderten Vorschrift und Richtlinien in der Endmontage von kundenspezifischen Schweißkonstruktionen.

Neben der schnellen Zuteilung von Arbeitsinhalten, zeichnet sich das Bedienkonzept durch die angepasste Unterstützung der Schweißfacharbeiter aus. Alle relevanten Montageinformationen werden durch Werkerassistenzsysteme am Schweißarbeitsplatz bereitgestellt. Die visuelle Darstellung der Schweißvorschrift erfolgt am Arbeitsplatz durch eine dreidimensionale Projektion direkt an der Schweißkonstruktion selbst. Anhand des entwickelten virtuellen Modells, welches die Schweißvorschrift beinhaltet, wird unter der Einhaltung der optimalen Schweißposition,



der Montageablauf automatisch generiert, um den Schweißfacharbeiter effizient bei der Positionierung der Baugruppe während der Endmontage zu unterstützen.

Die Anpassung von bestehenden automatisierten Prozessabläufen ist ohne Programmierkenntnisse durch das vorliegende Bedienkonzept möglich. Dank der visuellen Assistenz auf der Baugruppe, der grafischen Bedienoberfläche und der Einbindung etablierter Peripherie, wie beispielsweise der Computermouse, ist das Anpassen der Schweißnaht auf dem betrieblichen Hallenboden wirtschaftlich realisierbar.

Die in Kombination mit dem Bedienkonzept entwickelte Messstrategie zeichnet sich durch das dreistufige Messverfahren aus. Der Abgleich einer virtuell geplanten Schweißnaht mit der Realität wurde in der Entwicklungsumgebung validiert und die Einhaltung der geforderten Prozessmerkmale überprüft. Die Skalierbarkeit des dreistufigen Messverfahrens trägt zum schnellen Einrichten des teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes sowie zur einfachen Identifizierung des Bezugskoordinatensystems bei.

Gegenüber den etablierten Schweißmesssystemen, die sich durch ein hochgenaues Vermessen der Schweißnaht mit hoher Abtastrate auszeichnen, überzeugt das dreistufige Messverfahren dieser Arbeit durch das anforderungsgerechte Vermessen der jeweiligen Schweißnaht.

### **5.3 Übertragbarkeit des angepassten Steuerungskonzepts in die Flugzeugbranche**

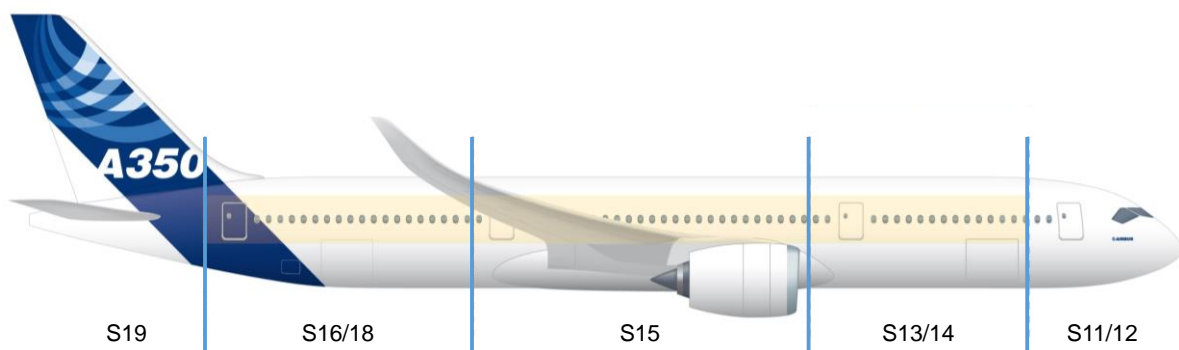
Wie im Sondermaschinenbau müssen auch in der Flugzeugproduktion noch viele komplexe Montagevorgänge manuell, durch erfahrene Fachkräfte, durchgeführt werden [114]. Neben hoher Komplexität werden die Montageprozesse in der Flugzeugproduktion durch hohe wirtschaftliche Risiken bestimmt. Die Montage ist aktuell durch starre Montagesysteme gekennzeichnet, was den großen Produktabmessungen bei gleichzeitig geringen Toleranzen geschuldet ist.

Etablierte Produktionswerke sind einem hohen Kostendruck, aufgrund der hohen Lohnkosten in Europa und den USA, ausgesetzt. Um diesem Kostendruck auszuweichen ist bereits jetzt eine Verlagerung von Produktionsumfängen der OEMs in Niedriglohnländer zu beobachten. Das wachsende Know-how in den Niedriglohnländern führt zu einem hohen internationalen Wettbewerb um die Produktionsstandorte [115, 116].

Die hohe Anzahl an Produktvarianten bei jeweils kleinen Stückzahlen hat zur Folge, dass eine Automatisierung der Montagesysteme häufig unwirtschaftlich ist [117]. Auch die schwankende Nachfrage erschwert eine Planung und effiziente Auslastung der Montagesysteme erheblich. Um der Problematik entgegenzuwirken und eine wirtschaftliche Automatisierung umzusetzen, ist ein Produktionssystem vonnöten, das für verschiedene Flugzeugtypen und -varianten individuell angepasst werden kann, wodurch eine hohe Auslastung der Produktionsanlagen gewährleistet wird.

Ein Lösungsansatz zur flexiblen Automatisierung von ausgewählten Prozessen (Dichtmittelauftrag, Nietprozesse, usw.) stellt die in dieser Arbeit vorliegende Konzeption eines teilautomatisierten Montagesystems dar, die eine Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter für die Montage der Sektionen von Passagierflugzeugen ermöglicht.

Bei der Montage von Flugzeugstrukturen wird der Rumpf aus verschiedenen Sektionen aufgebaut, siehe Abbildung 113. So bestehen die Sektionen des Airbus 350 aus zwei Seitenschalen, einer Oberschale und einer Unterschale sowie einer Fußbodenstruktur, siehe Abbildung 114. Die Fußbodenstruktur besteht in der Regel aus den Bodentraversen, den Sitzschienenprofilen und den dazugehörigen Sitzschienen. Zusätzlich gibt es Bodenplatten, die in die offenen Stellen zwischen den Bodenquerträgern eingelegt werden.



**Abbildung 113 Aufbau eines Passagierflugzeugs Airbus A350 [118]**

Während des Montageprozesses wird die Fußbodenstruktur mit hunderten von Klipsen und Haltern sowie tausenden von Nieten montiert. Anschließend werden die Halterkonturen und Nietstellen durch den Auftrag einer Dichtmasse vor Korrosion geschützt. Bis heute erfolgt das Abdichten der Nietköpfe und der Halterstruktur in einem manuellen Montageprozess [119].

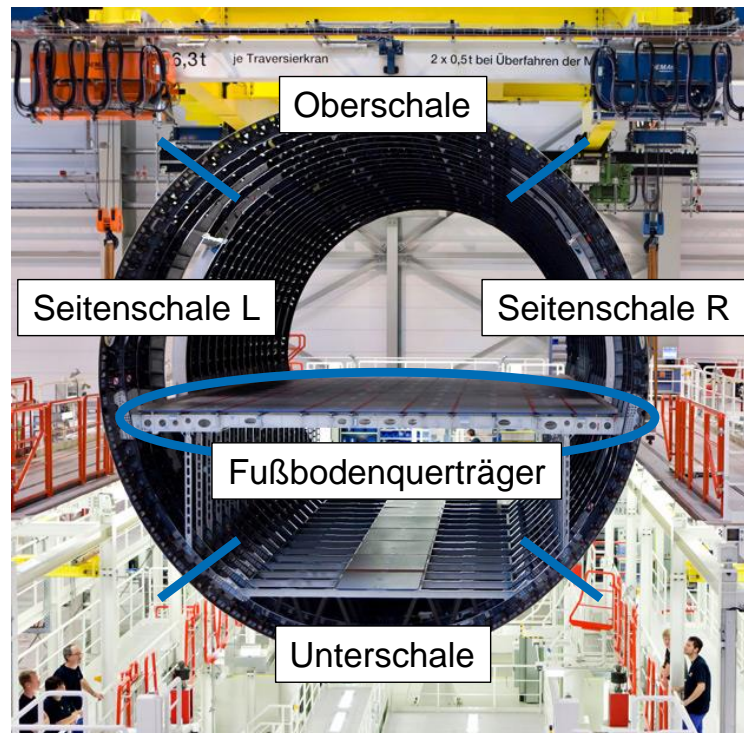


Abbildung 114 Aufbau einer Flugzeugsektion [118]

Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie wurde die Übertragbarkeit der Entwicklung des teilautomatisierten Montagesystems in der Flugzeugbranche geprüft. Basierend auf der bedarfsgerechten Automatisierung kann das Potential der vorliegenden Arbeit für die Montage eines Fußbodenquerträgers aufgezeigt werden. Montagemitarbeiter und Robotersysteme arbeiten zusammen in einem sich überschneidenden Arbeitsraum ohne trennende Schutzeinrichtung [120].

Das Ziel ist, den Mitarbeiter im Montageprozess mit einem MRK-fähigen Robotersystem und neuartigen Assistenzsystemen zu unterstützen, um eine Steigerung der Effizienz und Qualität zu erreichen.

Die Gestaltung des Arbeitsplatzes sieht dabei eine fähigkeitsbasierte Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter vor. Der Montagemitarbeiter übernimmt das Setzen der komplexen Dichtraupen an den Halterstrukturen. Das Setzen der Dichthaube an den Nietverbindungen übernimmt hingegen das MRK-fähige Robotersystem. Die Montageprozesse erfolgen, dank der sicheren Arbeitsplatzgestaltung, in einer kooperierenden Form und steigern damit die Effizienz des Montagesystems durch die Parallelisierung der Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter. Das Sicherheitskonzept sieht eine kollisionsfreie Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter vor, das bedeutet, Manipulator und Prozesswerkzeug sind mit einer kontaktlosen Sensorik ausgestattet, welche den Aufenthalt eines Objekts oder eines Mitarbeiters detektieren. Das Robotersystem wird unmittelbar nach der Detektion stillgesetzt und nachdem der Arbeitsraum durch die Sensorik wieder freigegeben werden kann, wird der Montageprozess des Robotersystems fortgesetzt.

Für die Validierung der Übertragbarkeit wurde eine Entwicklungsumgebung aufgebaut (Abbildung 115), die eine Bewertung des Potentials einer Teilautomatisierung in der Flugzeugstrukturmontage ermöglicht.



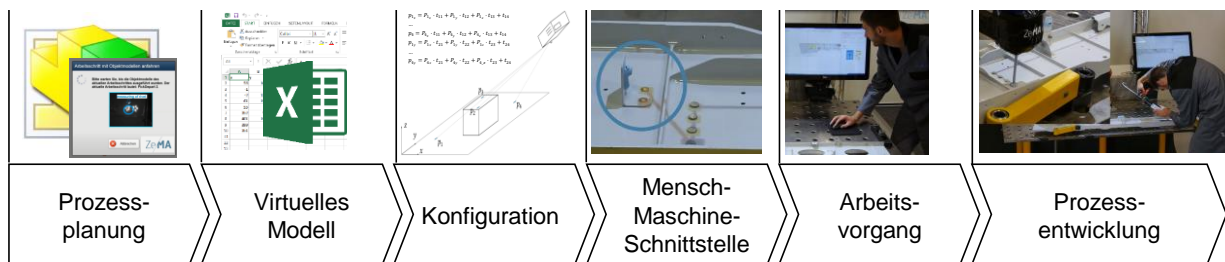
**Abbildung 115 Entwicklungsumgebung für das Abdichten eines Fußbodenquerträgers**

Im Folgenden wird die Konzeption des angepassten Steuerungskonzepts für die Prozessentwicklung und Prozessführung in der Montage eines Fußbodenquerträgers beschrieben und anschließend die entwickelte Mensch-Maschine-Schnittstelle erläutert.

### **5.3.1 Angepasstes Steuerungskonzept für die Prozessentwicklung und Prozessführung in der Flugzeugbranche**

Damit der Montagemitarbeiter das Montagesystem schnell und intuitiv steuern und programmieren kann, ist ein maßgeschneidertes Steuerungskonzept für die Prozessentwicklung und Prozessführung des Dichtmittelauftrages gefordert. Die Gestaltung des Bedienkonzeptes erfolgt nach der in Kapitel 4.1 vorgestellten Methodik zur Entwicklung eines angepassten Bedienkonzeptes (Abbildung 116) und stellt dabei eine hybride Programmierung des Montagesystems dar. Das Einrichten der Abdichtstation setzt sich aus vorprogrammierten Makros und der Anpassungsfähigkeit von Arbeitsinhalten durch den Montagemitarbeiter auf dem betrieblichen Hallenboden zusammen.

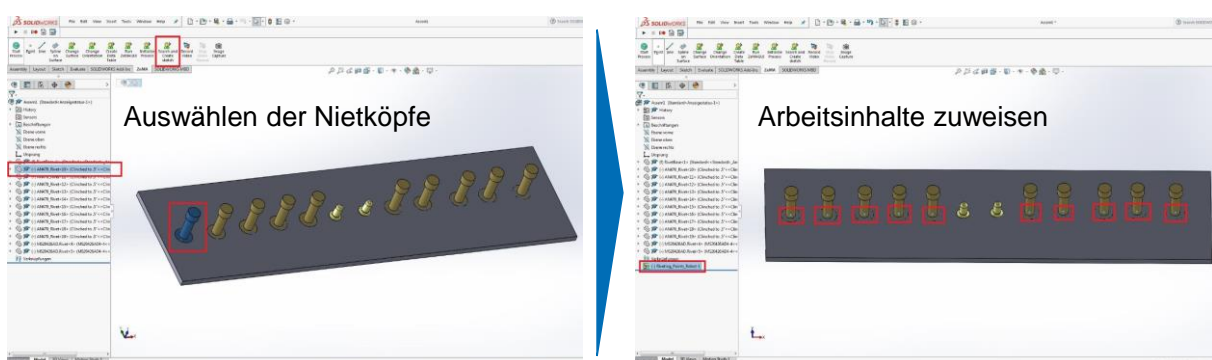
Der Ansatz besteht aus einer grafischen Benutzeroberfläche, die aus den Prozessmakros für das Auftragen einer Abdichthaube und der Position der Montageaufgabe automatisch das Roboterprogramm erstellt.



**Abbildung 116** Angepasstes Bedienkonzept für das Abdichten von Verbindungselementen am Fußbodenquerträger

Dabei zeichnet sich das entwickelte Konzept durch eine einfache Simulationsumgebung, eine universelle Betriebsmittelschnittstelle für Roboter, die Einbindung der Sensoren und eine visuelle Schnittstelle für die Mitarbeiterassistenz aus.

Die Planung und Entwicklung des Fußbodenquerträgers erfolgt mithilfe der vorliegenden CAD-Daten oder mit der Modellierung der Baugruppe durch Kamerabilder und bietet dem Anwender eine visuelle und intuitive Gestaltung der Planung und Entwicklung des Montagesystems. Innerhalb dieses Steuerungskonzeptes können CAD-Daten direkt zur Programmierung des Robotersystems verwendet werden. Aufgrund der standardisierten CAD-Datenformate ist eine schnelle und einfache Integration im Steuerungskonzept möglich. Die Auswahl der Montageaufgaben wird durch eine einfache Erweiterung des CAD-Programms erzielt. Durch die zusätzliche Funktion „Bauteil suchen“ werden alle Bauteile auf dieser Oberfläche markiert und können leicht in den entsprechenden Arbeitsplan hinzugefügt werden (Abbildung 117).



**Abbildung 117** Schnelle und einfache Zuweisung der Arbeitsinhalten an der Baugruppe

Nach dem Anlegen der Arbeitsinhalte werden diese aus dem CAD-Programm automatisch in das virtuelle Modell überführt und finalisiert. Das virtuelle Modell bleibt hier unverändert und ist eine Kombination aus Prozessinformationen, Positions- und Orientierungsdaten sowie Aufgabeninformationen, mit denen der teilautomatisierte Arbeitsplatz komplett beschrieben wird und der Roboter, wie auch der

Montagemitarbeiter, seine verschiedenen Arbeitsinhalte erfüllen kann. Aus dem virtuellen Modell der Abdichtanwendung werden die Roboterbahnen und die Posen des Prozesswerkzeugs aus dem Steuerungskonzept geladen und als Makros gespeichert. Die Konfiguration des Montagesystems erfordert das Identifizieren aller Bezugskoordinatensysteme. Als visuelle Assistenz kommen mehrere Bildprojektoren zum Einsatz, welche in der Konfigurationsphase nach der dargestellten Methodik in Kapitel 4.1.3 eingemessen werden.

Sobald die Konfiguration für das teilautomatisierte Montagesystem abgeschlossen ist, werden dem Montagemitarbeiter über die Mensch-Maschine-Schnittstelle die korrekten Montageaufgaben angezeigt. Während des Arbeitsvorgangs können, falls erforderlich, die Montagevorgänge angepasst und freigegeben werden. Die Anpassung des Montagevorgangs kann beispielsweise durch eine Änderung der Variante des Fußbodenträgers erforderlich sein. Mittels der grafischen Benutzeroberfläche kann die Anpassung der Applikation des Abdichtprozesses oder eine kleine Korrektur der Pose des Prozesswerkzeugs und der Roboterbahn erfolgen.

Abschließend ist die Prozessentwicklung der Abdichtaufgabe erforderlich. Über die grafische Benutzeroberfläche wird der Prozess definiert, dabei ist die Eingabe der Appliziermenge des Dichtmittels, die geometrische Abmessung der Niete und die An- und Abrückhöhe erforderlich. Daraus wird das entsprechende Applikationsmakro generiert und an das Robotersystem übermittelt. Nach der Entwicklung des automatisierten Abdichtprozesses wird dieser für die jeweilige Nietvariante abgelegt.

Aus diesen Informationen kann die Arbeitsplatzgestaltung zwischen Roboter und Mensch erstellt werden. Die für den Montagemitarbeiter geplanten Aufgaben sind rot markiert, während die Aufgaben für den Roboter gelb markiert sind, siehe Abbildung 118. Der Mitarbeiter kann die Aufgaben zwischen dem Roboter und sich selbst anpassen, sollte die Aufteilung für die jeweilige Montageaufgabe an der Fußbodenquerträgervariante hinsichtlich der Zugänglichkeit der Nietverbindung falsch geplant worden sein.

Um die möglichen Abweichungen vom virtuellen Modell des Fußbodenquerträgers auf der realen Baugruppe zu kompensieren, wird das Bezugskoordinatensystem identifiziert und die verbleibenden Abweichungen an den jeweiligen Nietverbindungen durch ein Offline-Messverfahren ausgeglichen, um das prozesssichere Applizieren des Dichtmittels zu gewährleisten.



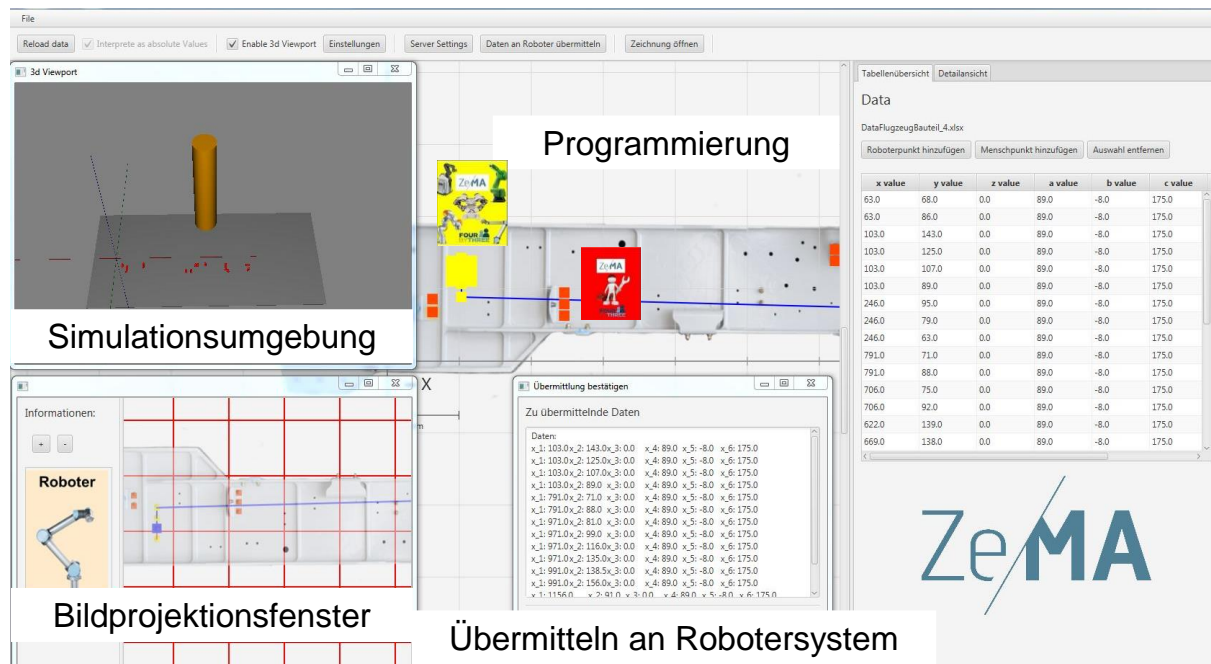


Abbildung 118 Grafische Benutzeroberfläche im teilautomatisierten Montagesystem für das Abdichten von Nieten am Fußbodenquerträger

### 5.3.2 Mensch-Maschine-Schnittstelle auf dem betrieblichen Hallenboden

Durch das oben beschriebene angepasste Steuerungskonzept mit den entsprechenden Assistenzfunktionen ist eine Verbesserung der Arbeitsqualität sowie eine Steigerung der Effizienz und der Qualität möglich, indem der Mitarbeiter in der Montage eines Fußbodenquerträgers unterstützt wird [115]. Diese Art der visuellen Assistenz wird in der Montage von Großbauteilen für Flugzeuge genutzt, um dem Mitarbeiter direkt auf dem betrieblichen Hallenboden die Arbeitsanweisungen und Montageinformationen mitzuteilen. Für die visuelle Assistenz im teilautomatisierten Montagesystem des Fußbodenquerträgers eignet sich der Bildprojektor, der kostengünstig den notwendigen Informationsgehalt bereitstellen kann.

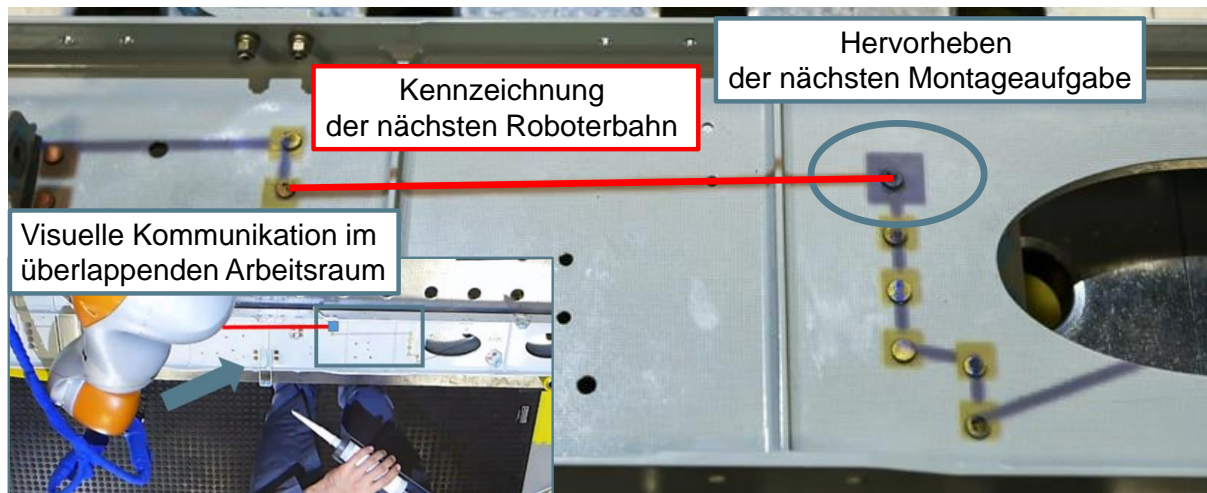
Der Bildprojektor, in Kombination mit dem MRK-fähigen Robotersystem, fungiert als Kommunikationsschnittstelle zwischen Mensch und Maschine. Mit der Projektion der Montageinformationen auf dem Fußbodenquerträger wird der Montagemitarbeiter im Arbeitsvorgang visuell unterstützt.

Die Abbildung 119 zeigt das intuitive Anpassen der Fußbodenquerträgervariante auf dem betrieblichen Hallenboden, dabei wird die Roboterbahn durch den Montagemitarbeiter angepasst. In diesem Beispiel wird das virtuelle Modell und die daraus resultierende offline programmierte Bahn durch eine Computermouse online, direkt an der Baugruppe, korrigiert. Neben der Bahnkorrektur kann die Aufgabenzuweisung zwischen Mensch und Roboter angepasst werden.





Potenzialausgleichspunktes sein, welcher durch den Facharbeiter weiterhin manuell mit einem Lackierverfahren versiegelt werden muss.



**Abbildung 120** Austausch an Bewegungsinformationen in einer sicheren MRK-Arbeitsplatzgestaltung

### 5.3.3 Fazit der Übertragbarkeit

Die Übertragbarkeit der Methodik zur Entwicklung eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes kann anhand des vorgestellten teilautomatisierten Montagesystems für die Flugzeugbranche aufgezeigt werden. Die Gestaltung des angepassten Steuerungskonzepts für die Prozessentwicklung und Prozessführung von Abdichtprozessen entspricht den Bedürfnissen der Flugzeugstrukturmontage. Die bislang überwiegend manuelle Montage von Flugzeugteilen kann mit der vorliegenden Konzeption eines teilautomatisierten Montagesystems bedarfsgerecht automatisiert werden. Durch die fähigkeitsbasierte Aufteilung der Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Roboter kann eine hohe Effizienz der Montageanlage und eine gesteigerte Qualität der Komponenten erzielt werden. Am Anwendungsfall des Abdichtprozesses in der Montage eines Fußbodenquerträgers wurde das Potenzial der integrierten Assistenzsysteme, an einer variantenreichen Baugruppe der Flugzeugbranche dargestellt.

Die hohe Effizienz des teilautomatisierten Montagesystems zeichnet sich durch ein schnelles Steuern, Programmieren und Bedienen der Abdichtprozesse aus. Ein wesentlicher Vorteil ist die hohe Flexibilität des Montagesystems, Anpassungen und Änderungen können direkt auf dem betrieblichen Hallenboden durch den Mitarbeiter durchgeführt werden und vereinfachen dadurch die Prozessführung. Damit lässt sich das System schnell an die hohen Anforderungen des Fußbodenquerträgers anpassen.

Im Gegenzug zu den bisherigen starren Montagesystemen mit trennender Schutzeinrichtungen kann aufgrund der mobilen Eigenschaften und ausgeprägten Sicherheitsfunktionen auf trennende Schutzeinrichtungen verzichtet werden. Das

entwickelte teilautomatisierte Montagesystem bietet eine einfache und innovative Möglichkeit in der Automatisierung, um Montageprozesse flexibel und wirtschaftlich gestalten zu können, um damit die Wettbewerbsfähigkeit von Hochlohnländern auch zukünftig sicherzustellen.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Der anhaltende Trend zur Montage von kundenspezifischen Produkten stellt nicht nur organisatorisch, sondern auch technisch eine Herausforderung in produzierenden Unternehmen dar. Das wachsende Know-how in den Niedriglohnländern und die hohen Lohnkosten in etablierten Unternehmen in Deutschland führen zu einem hohen internationalen Wettbewerb und zwingen die Unternehmen, ihre Produktivität stetig zu steigern.

Durch die sich ständig ändernden Systemanforderungen in der Montage von kundenspezifischen Produkten ist bisher eine wirtschaftliche Automatisierung der Montagevorgänge nur bedingt möglich. Gerade das automatisierte Schweißen von hochwertigen Schweißkonstruktionen im Sondermaschinenbau erfordert hohe Investitionskosten und zusätzlich hohe Servicekosten für die Inbetriebnahme. Für die individuelle Anpassung der Schweißprozesse werden in der Regel fundamentale Kenntnisse in der Programmierung von automatisierten Montageanlagen benötigt. Diese Kenntnisse sind nur bedingt und in geringer Kapazität in den Unternehmen des Sondermaschinenbaues vorhanden.

Die kundenspezifische Montage im Sondermaschinenbau ist bis heute geprägt durch die manuellen Arbeitsprozesse. Der Facharbeiter zeichnet sich in der Montage von variantenreichen Baugruppen durch seine schnelle Anpassungsfähigkeit im Montageprozess aus. Komplexe Schweißnähte können durch die erfahrenen Schweißfacharbeiter für kurze Zeit, in einer herausragenden Verbindungsqualität gesetzt werden. Jedoch kann die eingeschränkte Konzentrationsfähigkeit und eine verminderte Aufmerksamkeit der Schweißfacharbeiter beim Setzen von langen Schweißnähten die geforderte Produktqualität nur mit hohen Kosten, verursacht durch Nacharbeit und den ggf. erforderlichen Neuanfertigungen von Schweißkonstruktionen, bereitgestellt werden.

Um die Produktivität in produzierenden Unternehmen zu steigern, wurde in dieser Arbeit der Lösungsansatz eines teilautomatisierten Arbeitsplatzes gewählt, der den Anforderungen einer Montage von kundenspezifischen Baugruppen gerecht wird und gerade den Bedürfnissen von kleinen und mittleren Unternehmensgrößen entspricht. Gegenüber dem Stand der Technik von automatisierten Roboterzellen kann der entwickelte Arbeitsplatz ohne Programmierkenntnisse im Bereich der Robotertechnologie an unterschiedliche Produkt- und Prozessanforderungen angepasst werden.

In dem angewandten Forschungsansatz dieser Arbeit wurde untersucht, wie die Arbeitsinhalte, in der variantenreichen Montage von kundenspezifischen Baugruppen, effizient zwischen Mensch und Roboter aufgeteilt werden können. Mit der vorliegenden Methodik zur Entwicklung eines teilautomatisierten Montagesystems wurde eine bedarfsgerechte Automatisierung am Beispiel eines Anwendungsfalles in Unternehmen des Sondermaschinenbaues aufgestellt. Dies erfolgte durch eine prozessorientierte, sichere Arbeitsplatzgestaltung, der anforderungsgerechten

Auswahl der Betriebsmittel und der Auswahl einer facharbeiterorientierten Bedienbarkeit des teilautomatisierten Arbeitsplatzes.

Um die Prozessentwicklung und die Prozessführung des teilautomatisierten Arbeitsplatzes zu erleichtern, wurde ein angepasstes Steuerungskonzept erarbeitet, welches die Gestaltung des Bedienkonzeptes und eine zugeschnittene Messstrategie beinhaltet und eine flexible Teilautomatisierung für die Unternehmen ermöglicht.

Mithilfe von einfachen Software-Erweiterungen wurde die Planung und Entwicklung der Montagevorgänge einer kundenspezifischen Baugruppe vereinfacht und automatisch in ein virtuelles Modell überführt. Das virtuelle Modell beinhaltet alle relevanten Randbedingungen für die Montage einer Baugruppe im teilautomatisierten Arbeitsplatz. Basierend auf dem virtuellen Modell wird der Facharbeiter intuitiv während des Einrichtens und während des Montageprozess der Baugruppe unterstützt. Dabei kommen verschiedene Assistenzfunktionen, wie beispielsweise eine grafische Bedienoberfläche für die schnelle Anpassung der Montageprozesse oder das visuelle Projizieren der Arbeitsinhalte auf der zu montierenden Baugruppe zum Einsatz. Durch einen Einmessprozess und dem Abgleich des virtuellen Modells zur Realität, mittels der skalierbaren Messstrategie, kann die reproduzierbare Qualität der Montageprozesse des teilautomatisierten Montagesystems sichergestellt werden.

Die Konzeption eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes wurde implementiert, in einer Entwicklungsumgebung validiert und die Funktionsfähigkeit für die einfache Prozessentwicklung und Prozessführung in der Montage von kundenspezifischen Baugruppen nachgewiesen.

Ein wichtiger Aspekt bei dem Aufbau eines teilautomatisierten Schweißarbeitsplatzes ist die Konzeption eines informationstechnischen Sicherheitskonzeptes, um unbefugten Zugriff auf die Station oder aber auch das Sabotieren des Produktionsablaufs zu verhindern. Dies wurde bislang in der Entwicklungsumgebung nicht umgesetzt.

Auf Basis der erworbenen Erkenntnisse wurde die Übertragbarkeit des teilautomatisierten Arbeitsplatzes und die Relevanz für weitere industrielle Anwendungen geprüft und anhand einer weiteren Entwicklungsumgebung validiert. Die Übertragbarkeit zeigt, dass die Konzeption des teilautomatisierten Arbeitsplatzes noch weitere Anwendungsfelder eröffnet.

Das erworbene Wissen der Arbeit erweitert den Forschungsbedarf und weist neue Forschungsräume auf, die neu ergründet werden können. Dazu zählt unter anderem die Gestaltung der Prozessparameter durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz.

## Literaturangaben

- [1] Bienowska, E., Bosch, G., Bütikofer, R., Dörre, K., Festge, R., Fücks, R., Graichen, P., Grimm, V., Hagemann, H. u. Hoffmann, R.: Welche Industrie wollen wir?: Nachhaltig produzieren - zukunftsorientiert wachsen. Campus Verlag 2015
- [2] Spillner, R.: Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion. Utz Verlag GmbH 2015
- [3] Sackgasse Hochautomatisierung? Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion, Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung, Lay, G. u. Schirrmeister, E., 2001
- [4] Shen, Y.: System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage. Utz Verlag GmbH 2015
- [5] International Federation of Robotics: Europäische Union belegt Spitzenplatz im globalem Automations-Wettbewerb. Frankfurt 2016
- [6] Von Deutschland führend beim Einsatz von Industrierobotern, Schönebeck, G., 2016
- [7] Krüger, J., Lien, T. K. u. Verl, A.: Cooperation of human and machines in assembly lines. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 2, S. 628–646
- [8] Thiemermann, S.: Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter. Heimsheim: Jost-Jetter Verlag 2005
- [9] Müller, R., Vette, M. u. Geenen, A.: Potentials of Human-Robot-Cooperation in Aircraft Assembly Systems. SAE International Paper 2015 (2015)
- [10] Woll Maschinenbau GmbH: Produzierendes Unternehmen, 2018.  
<https://www.woll-maschinenbau.com/index.php?pg=unternehmen>, abgerufen am: 15.08.2018
- [11] Ulrich, H. (Hrsg.): Die Führung des Betriebes. Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. Stuttgart: Poeschel 1981
- [12] Norm DIN 8593:2003-09. *Fertigungsverfahren Fügen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-8593-0/65031206>
- [13] Technische Regel VDI 2815 Blatt 1:1978-05:1978-05. *Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung - Einführung, Grundlagen*.  
<https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2815-blatt-1/539599>
- [14] Technische Regel VDI 2860:1990-05:1990-05. *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2860/847032>
- [15] Grote, K. H. u. Feldhusen, J.: Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau. S7 Fertigungs- und Fabrikbetrieb. Springer Berlin Heidelberg 2014
- [16] Feldhusen, J. u. Grote, K. H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer Berlin Heidelberg 2013

- [17] Organisationsformen der Montage. Schriftreihe des Instituts für Produktionswirtschaft der Universität Rostock, Petersen, T., 2005
- [18] Lotter, B. u. Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. VDI-Buch. Berlin: Springer Berlin 2012
- [19] Vette-Steinkamp, M.: Rekonfigurierbares Robotersystem für die Montage von flächigen Flugzeugstrukturbauteilen, RWTH Aachen u. Shaker Verlag GmbH Dissertation
- [20] Marktchance Individualisierung, Reinhart, G. u. Zäh, M., 2003
- [21] Vette, M.: Rekonfigurierbares Robotersystem für die Montage von flächigen Großbauteilen. 2018
- [22] Technische Regel VDI 2222 Blatt 1:1997-06:1997-06. *Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien.*  
<https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-2222-blatt-1/1263417>
- [23] Konold, P. u. Reger, H.: Praxis der Montagetechnik. Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. Vieweg Praxiswissen. Wiesbaden: Vieweg 2009
- [24] Konold, P. u. Weller, B.: Flexible Montagesysteme. Konzeption und Feinplanung durch Kombination von Elementen. IPA IAO Forschung und praxis, Bd 85. Springer-Verlag 1985
- [25] Norm DIN IEC 60050-351:2014-09:2014-09. *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2013).*  
<https://www.beuth.de/de/norm/din-iec-60050-351/208013542>
- [26] Lotter, B., Hartel, M. u. Menges, R.: Manuelle Montage - wirtschaftlich gestalten: neuzeitliche Analysen und Planungsmethoden zur Montagerationalisierung. Expert-Verlag 1998
- [27] Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten, Nyhuis, P., Reinhart, G. u. Abele, E., Garbsen 2008
- [28] Wiendahl, H. P., Reichardt, J. u. Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG 2014
- [29] Reinhart, G., Krebs, P. u. Schellmann, H. (Hrsg.): Flexibilität und Wandlungsfähigkeit - das richtige Maß finden. Münchener Kolloquium: Innovationen für die Produktion 2008
- [30] Hernández Morales, R.: Systematik und Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Fortschritt-Berichte / VDI. Reihe 16, Technik und Wirtschaft, Nr. 149. Düsseldorf: VDI-Verl. 2003
- [31] Cisek, R.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 2002 (2002) 97 Nr. 9, S. 441–445
- [32] Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor’s New Clothes or Key Factor for Future Success?, Zäh, M. F., Möller, N. u. Vogl, W., 2005
- [33] Nowacki, C.: Szenariobasierte Konfiguration der Produktmixflexibilität am Beispiel der Fertigung einer Lithium-Ionen-Batteriezelle. Apprimus Wissenschaftsverlag 2016

- [34] Nyhuis, P., Heinen, T., Reinhart, G. u. Rimpau, C.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Werkstattstechnik online 2008 98, S. 85–91
- [35] Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit - Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. wt Werkstattstechnik online 2002 (2002) 92, S. 122–127
- [36] Rapp, T.: Produktstrukturierung: Komplexitätsmanagement durch modulare Produktstrukturen und -plattformen. München: ID-Consult GmbH 2010
- [37] Heisel, U. u. Meitzner, M.: Rekonfigurierbare Bearbeitungssysteme. Werkstattstechnik online 2004 94, S. 517–520
- [38] Verl, A. u. Naumann, M.: Plug'n'Produce - Steuerungsarchitektur für Roboterzellen. wt Werkstattstechnik online 2008 05, S. 384–390
- [39] GSI - SLV (Hrsg.): DVS-IIW-Lehrgang Internationaler Schweißfachingenieur nach Richtlinie DVS-IIW 1170. Schweißprozesse und -ausrüstung, Bd. 1. Hamburg 2011
- [40] Norm DIN EN 14610:2005-02:2005-02. *Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe für Metallschweißprozesse*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-14610/76291383>
- [41] Todtermuschke, M.: Schweißtechnik. Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen, mit 497 Bildern, 95 Tabellen und 21 Tafeln
- [42] Norm DIN 1910-100:2008-02:2008-02. *Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-1910-100/102990712>
- [43] Norm DIN EN ISO 14175:2008-06:2008-06. *Schweißzusätze - Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14175/104764500>
- [44] DIN EN ISO 6947:2011-08:2011-08. *Schweißen und verwandte Prozesse - Schweißpositionen*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-6947/132716314>
- [45] Wilhelm Merkle Schweißtechnik GmbH: Schweißnahtformen – Schweißnähte Nahtformen, München. <http://www.schweisskurse-merkle.de/ratgeber/schweissnaehte-schweissnahtformen/>, abgerufen am: 24.07.2017
- [46] GSI - Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH & SLV - Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalten: Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe. Mit Sch(w)eißanweisung wäre das nicht passiert! Oder? [http://www.die-verbindungs-spezialisten.de/fileadmin/user\\_upload/LV\\_BV/BV\\_Gelsenkirchen/v\\_2013-1/\\_15607\\_V01.pdf](http://www.die-verbindungs-spezialisten.de/fileadmin/user_upload/LV_BV/BV_Gelsenkirchen/v_2013-1/_15607_V01.pdf)
- [47] Norm DIN EN ISO 9001:2015-11:2015-11. *Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-9001-2015-11/235671251>
- [48] GSI - SLV (Hrsg.): DVS-IIW-Lehrgang Internationaler Schweißfachingenieur nach Richtlinie DVS-IIW 1170. Fertigung und Anwendungstechnik, Bd. 4. Hamburg 2011
- [49] Deutsche Regelwerke DVS 0922-2:1991-06. *Industrierobotersysteme zum Schutzgasschweißen, Steuerungs- und Programmierfunktionen*. <http://www.dvs->

- media.eu/de/deutsche-regelwerke/lichtbogenschweissen/2021/industrierobotersysteme-zum-schutzgasschweissen-steuerungs-und-programmierfunktionen-dvs-0922-2
- [50] VDI-Richtlinien VDI 2861:1988-06. *Montage- und Handhabungstechnik; Kenngrößen für Industrieroboter; Achsbezeichnungen*. <https://www.beuth.de/de/fachgebiete/maschinenbau/fachdaten-einzelsicht/wdc-beuth:din21:777254/toc-2246773/download>
- [51] Weber, W.: Industrieroboter: Methoden der Steuerung und Regelung ; mit ... 33 Übungsaufgaben sowie einer begleitenden Internetseite. Leipzig: Carl-Hanser-Verlag 2009
- [52] Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller: Kinematik, Dynamik und Anwendungen in der Robotik. Programmierung, Bahnplanung und -generierung. Aachen 2009
- [53] Gruber, R.: Handsteuersystem für die Bewegungsführung. Vieweg+Teubner Verlag 2013
- [54] Weber, W.: Industrieroboter. Methoden der Steuerung und Regelung : mit 146 Bildern und 30 Übungsaufgaben sowie einer begleitenden Internetseite unter [www.weber-industrieroboter.eit.h-da.de](http://www.weber-industrieroboter.eit.h-da.de). München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag 2017
- [55] Roos, E.: Anwendungsorientierte Meß- und Berechnungsverfahren zur Kalibrierung off-line-programmierter Roboterapplikationen. VDI-Verlag 1998
- [56] Spur, G., Feldmann, K. u. Schöppner, V.: Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG 2013
- [57] Weck, M.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme: Automatisierung von Maschinen und Anlagen. Springer Berlin Heidelberg 2013
- [58] Hesse, S. u. Malisa, V.: Taschenbuch Robotik - Montage - Handhabung. Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG 2016
- [59] Craig, J. J.: Introduction to Robotics: Mechanics and Control. Pearson/Prentice Hall 2005
- [60] Norm DIN EN ISO 13849-2:2013-02. *Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 2: Validierung (ISO 13849-2:2012)*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-13849-2/152752867>
- [61] Norm DIN EN ISO 12100:2011-03:2011-03. *Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsgrundsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-12100/128264334>
- [62] Norm-Entwurf DIN EN 60204-1:2014-10; VDE 0113-1:2014-10:2014-10. *Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. <https://www.beuth.de/de/norm-entwurf/din-en-60204-1/216809027>
- [63] Deutsches Regelwerk DVS 0927-1:2005-02. *Sensoren für das vollmechanische Lichtbogenschweißen*. <http://www.dvs-media.eu/de/deutsche-regelwerke/lichtbogenschweissen/2112/sensoren-fuer-das-vollmechanische-lichtbogenschweissen-dvs-0927-1>



- [64] Leichtbauroboter in der manuellen Montage - Einfach einfach Anfahren, Bauer, W., Stuttgart 2016
- [65] Norm DIN EN ISO 10218-2:2012-06:2012-06. *Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration (ISO 10218-2:2011)*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-10218-2/127655829>
- [66] Merkmale der Mensch-Roboter-Kooperation im produktiven Umfeld, Reichenbach, D. M., Magdeburg 2013
- [67] Botthof, A. u. Hartmann, E. A.: Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Open. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2015
- [68] DGUV Information 209-074 - Industrieroboter, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V, Berlin 2015
- [69] Technische Regel DIN ISO/TS 15066:2017-04; DIN SPEC 5306:2017-04:2017-04. *Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter*. <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-iso-ts-15066/263754912>
- [70] DGUV\_Information. Kollaborierende Robotersysteme - Planung von Anlagen mit der Funktion "Leistungs- und Kraftbegrenzung", Berufsgenossenschaft Holz und Metall, Mainz 2015
- [71] Müller, R., Vette, M. u. Geenen, A.: Potentiale der Mensch-Roboter-Kooperation in der Flugzeugproduktion. Bedarfsgerechte, angepasste, temporäre Automatisierung. wt Werkstattstechnik online 2015 9-2015, S. 614–618
- [72] Weckenmann, A.: Koordinatenmesstechnik. Indoor GPS (Global Positioning System). München: Hanser Verlag 2012
- [73] Norm DIN EN ISO 3834-1:2006-03. *Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-3834-1/83391313>
- [74] Norm DIN EN ISO 15609-1:2005-01:2005-01. *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Schweißanweisung - Teil 1: Lichtbogenschweißen*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-15609-1/66573010>
- [75] Norm DIN EN ISO 13485:2016-08. *Medizinprodukte - Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen für regulatorische Zwecke*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-13485/244078306>
- [76] Diltthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren. VDI. Berlin: Springer 2006
- [77] Broetje-Automation GmbH: Vollautomatisierter Nietroboter in der Strukturmontage. <https://www.broetje-automation.de/>, abgerufen am: 15.06.2018
- [78] Schuler, V.: Schweißtechnisches Konstruieren und Fertigen
- [79] Norm DIN EN ISO 6520-1:2007-11. *Schweißen und verwandte Prozesse - Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-6520-1/94109130>, abgerufen am: 02.01.2018
- [80] Norm DIN EN ISO 13920:1996-11:1996-11. *Schweißen - Allgemeintoleranzen für Schweißkonstruktionen - Längen- und Winkelmaße; Form und Lage*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-13920/2884568>

- [81] Langhorst, M.: Beherrschung von Schweißverzug und Schweißeigenspannungen. München: Technischen Universität München 2015
- [82] Eigenspannungen und Verzug beim MAG-Schweißen, Gunzelmann, J., Schweinfurt 2015
- [83] Köstermann, H.: Schweißen von Stahl- und Gußrohren. Vulkan-Verlag 1997
- [84] Merkblatt DVS 0922-3:2004-04. *Industrierobotersysteme zum Schutzgasschweißen - Positioniersysteme für Werkstücke und Industrieroboter*. <https://www.dvs-media.eu/de/deutsche-regelwerke/lichtbogenschweissen/2164/industrierobotersysteme-zum-schutzgasschweissen-positioniersysteme-fuer-werkstuecke-und-industrieroboter-dvs-0922-5>
- [85] Schunk GmbH & Co. KG Spann- und Greiftechnik: Laserbearbeitungsmaschine PSM 400. Für anspruchsvolle Schweißaufgaben, 2012. <https://www.form-werkzeug.de/produkte/uebersicht/beitrag/laserbearbeitungsmaschine-psm-400-864668.html>, abgerufen am: 23.08.2017
- [86] Migatronik Schweißmaschinen GmbH: CoWelder™ – Die smarteste Automatisierungslösung, 2017. [https://www.migatronik.com/Admin/Public/DWSDownload.aspx?File=%2FFiles%2FFiles%2FPDF%2FAutomated\\_Welding%2FCoWelder%2F52169203\\_CoWelder.pdf](https://www.migatronik.com/Admin/Public/DWSDownload.aspx?File=%2FFiles%2FFiles%2FPDF%2FAutomated_Welding%2FCoWelder%2F52169203_CoWelder.pdf), abgerufen am: 24.08.2017
- [87] Kuka Systems: Automation Kinderleicht mit dem KUKA flexibleCUBE, Augsburg. <https://www.kuka.com/de-ch/branchen/loesungsdatenbank/2016/07/solution-industries-hartan>, abgerufen am: 24.08.2017
- [88] i-cube - universales Roboter-Sensor-System, Servo-Robot GmbH, Karlsruhe 2016
- [89] Fraunhofer - Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: INTEACH-Intuitive Roboterprogrammierung, Stuttgart 2009. [https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Roboter--und-Assistenzsysteme/Produktblatt\\_Inteach.pdf](https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Roboter--und-Assistenzsysteme/Produktblatt_Inteach.pdf), abgerufen am: 22.02.2018
- [90] Fraunhofer - Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA: Automatisches Einmessen von prozessrelevanter Peripherie, Stuttgart 2014. [https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Roboter--und-Assistenzsysteme/Produktblatt\\_Automatisches\\_Einmessen.pdf](https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Roboter--und-Assistenzsysteme/Produktblatt_Automatisches_Einmessen.pdf), abgerufen am: 25.08.2017
- [91] Müller, R., Franke, J., Henrich, D., Kuhlenkötter, B., Raatz, A. u. Verl, A.: Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration. München: Hanser 2019
- [92] Norm DIN EN 60601-1:2013-12. *Medizinische elektrische Geräte - Teil 1: Allgemeine Festlegungen für die Sicherheit einschließlich der wesentlichen Leistungsmerkmale*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-60601-1/193923032>
- [93] Norm DIN EN ISO 14971:2013-04. *Medizinprodukte - Anwendung des Risikomanagements auf Medizinprodukte*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14971/170088031>

- [94] Norm DIN EN 10027-1:2017-01:2017-01. *Bezeichnungssysteme für Stähle - Teil 1: Kurznamen*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-10027-1/262540217>
- [95] Bullinger, H. J., Ammer, D. u. Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation: Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis. Hanser 1986
- [96] Ross, P.: Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung. Utz 2002
- [97] Klimmer, F.: Hand-Auge-Koordination und Training bei simulierter Monitor-Endoskopie. GRIN Verlag 2010
- [98] Improving Working Conditions in Aircraft Productions using Human-Robot-Collaboration in a Collaborative Riveting Process. AeroTech Congress & Exhibition
- 2017-01-2096, Müller, R., Vette, M., Geenen, A., Masiak, T., 2017
- [99] Tolerance Management as an Enabler for Human-Robot-Collaboration in a Semi-Automated Riveting Process. SAE Technical Paper 2019-01-1373, Mueller, R., Vette-Steinkamp, M., Schirmer, L. u. Masiak, T., 2019
- [100] Richtlinie ABl. EG Nr. L 157/24;:2006-06. *RICHTLINIE 2006/42/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG*
- [101] Richtlinie ABl. EU Nr. L 96/357, 29. März 2014:2014-03. *Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt*
- [102] Richtlinie ABl. EG Nr. L 96/79, 29. März 2014:2014-03. *Richtlinie 2014/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit*
- [103] Norm DIN EN ISO 13849-1:2016-06. *Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-13849-1/230387878>
- [104] Norm DIN EN ISO 13855:2010-10. *Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen*. <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-13855/124231614>
- [105] Prof. Dr. Bernd Kuhlenkötter: Mensch-Roboter-Kombination. TU Dortmund. Berlin 2015
- [106] ABB Group: Yumi. <https://new.abb.com/products/robotics/de/industrieroboter/yumi>, abgerufen am: 13.06.2018
- [107] Robert Bosch GmbH: APAS assistant. <https://www.bosch-apas.com/start/>, abgerufen am: 14.06.2018

- [108] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V.: Antrieb Leichtbauroboter
- [109] Computer & AUTOMATION - Fachmagazin der Fertigungs- und  
Prozesstechnik
- , Spezialisten überflüssig - Die Sensorik Integration, Jan Deiterding , Dominik  
Henrich, 2009
- [110] R. Y. Tsai: An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D  
Machine Vision. Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and  
Pattern Recognition. Miami Beach 1986
- [111] Z.Zhang: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,. A  
flexible new technique for camera calibration. 22:1330–1334,
- [112] Einrichtung - automatische TCP-Kalibrierung, Fiedler, M., 2015
- [113] GSI - SLV (Hrsg.): DVS-IIW-Lehrgang Internationaler Schweißfachingenieur  
nach Richtlinie DVS-IIW 1170. Werkstoffe und ihr Verhalten beim Schweißen,  
Bd. 2. Hamburg 2011
- [114] Müller, R., Vette, M. u. et al.: Innovative Produktionsassistenz für die Montage  
- Intelligente Werkerunterstützung bei der Montage von Großbauteilen in der  
Luftfahrt. Werkstattstechnik online 2014 104 H9
- [115] Reitter, E.: Premium AEROTEC eröffnet Werk in Rumänien und setzt  
Wachstumskurs fort. Augsburg
- [116] Airbus Group: Global presence - Airbus Group in China. 2015
- [117] Wirtschaftlich, wandlungsfähig und rekonfigurierbar. Wandlungsfähiges  
Montagesystem für Großbauteile am Beispiel der Flugzeugstrukturmontage,  
Zukunftsfähige Montagesysteme, Müller, R. u. et al., Stuttgart 2013
- [118] Premium AEROTEC GmbH: Aufbau und Sektionen des Passagierflugzeugs  
Airbus A350. premium-aerotec.com, abgerufen am: 10.10.2016
- [119] Handhabung großer Bauteile zur Flugzeugmontage mittels eines Verbunds  
kinematischer Einheiten unterschiedlicher Struktur, Müller, R., Vette, M. u.  
Quinders, S., Aachen 2012
- [120] Sichere Zusammenarbeit von Mensch und Industrieroboter Nr. 33, Hülke M.,  
Umbreit M. u. Ottersbach H., 2010

# Anhang

**Tabelle a**

Arbeitsinhalte	Qualifizierung	Betriebsmittel
Konstruktion der Baugruppe	Konstrukteur	rechnerunterstütztes Konstruieren
Auswahl der Fügeverfahren	Konstrukteur	rechnerunterstütztes Konstruieren
Festlegung der Schweißreihenfolge	Schweißfachingenieur	Tabellenkalkulationsprogramm
Erstellen der Schweißreihenfolge	Schweißtechniker	Tabellenkalkulationsprogramm
Festlegung der Schweißprozesses	Schweißfachingenieur	Tabellenkalkulationsprogramm
Erstellen der Schweißparameter	Schweißtechniker	Tabellenkalkulationsprogramm
Erstellen der Schweißvorschrift (WPS)	Schweißfachingenieur	Tabellenkalkulationsprogramm
Erstellen der Fertigungszeichnungen	Technischer Zeichner	rechnerunterstütztes Konstruieren
Planen der Produktionsabläufe	Produktdesigner	ohne softwaregestützte Systeme
Erstellen der Produktionsdokumente	Produktdesigner	Rechner, Drucker

**Tabelle b**

Arbeitsinhalte	Qualifizierung	Betriebsmittel
Bereitstellung Material	Fachkraft für Lagerlogistik	Flurfürderfahrzeuge
Transport Fertigungsplatz	Fachkraft für Lagerlogistik	Flurfürderfahrzeuge
Zuführen	Facharbeiter	
	Laserschneiden	Deckengeführte Krananlage
Einrichten des Zuschnitts	Facharbeiter	rechnerunterstützte
	Laserschneiden	Fertigungssystem
	Facharbeiter	rechnerunterstützte
Fertigen der Zuschnitte	Laserschneiden	Fertigungssystem
	Facharbeiter	
Bauteile entladen	Laserschneiden	Deckengeführte Krananlage
Transport Montage Heften	Fachkraft für Lagerlogistik	Flurfürderfahrzeuge

**Tabelle c**

Arbeitsinhalte	Qualifizierung	Betriebsmittel
Arbeitsplatz einrichten	Schweißfacharbeiter	ggf. Hebevorrichtung
Schweißparameter auswählen	Schweißfacharbeiter	manuelle Schweißausrüstung
Justieren der Bauteile n	Schweißfacharbeiter	Spannsysteme für Justage
Punktschweißen n	Schweißfacharbeiter	manuelle Schweißausrüstung
Justieren der Baugruppe n+1	Schweißfacharbeiter	Spannsysteme für Justage
Punktschweißen n+1	Schweißfacharbeiter	manuelle Schweißausrüstung
Überprüfung der Toleranzen	Schweißfacharbeiter	Prüfmittel und ggf. Messmittel
ggf. Nacharbeit	Schweißfacharbeiter	Trennwerkzeuge, Schweißausrüstung
Kennzeichnen der Baugruppe	Schweißfacharbeiter	Beschriftungsgeräte
ggf. Abdichten der Schweißnähte	Schweißfacharbeiter	Industrieklebeband
Dokumentation der Arbeitsschritte	Schweißfacharbeiter	Papierprotokolle (Laufzettel)
...		

Tabelle d

Arbeitsinhalte	Qualifizierung	Betriebsmittel
Betriebsmittel auswählen	Schweißfacharbeiter	Schweißvorschrift (WPS)
Beladen der Montagezelle	Schweißfacharbeiter	ggf. Hebevorrichtung
Schweißparameter auswählen n	Schweißfacharbeiter	manuelle Schweißausrüstung
Ermitteln der Vorzugslage n (laut WPS)	Schweißfacharbeiter	Schweißvorschrift (WPS)
Positionieren der Baugruppe n	Schweißfacharbeiter	Spannsysteme für Positionierung
ggf. passive Prozessgase einleiten n	Schweißfacharbeiter	keine Hilfsmittel erforderlich
ggf. Abdichtung entfernen n	Schweißfacharbeiter	keine Hilfsmittel erforderlich
ggf. Anpassung der Schweißnaht n	Schweißfacharbeiter	Vermessen und Dokumentieren
ggf. Dokumentation der Anpassung n	Schweißfacharbeiter	Papierprotokolle (Laufzettel)
Setzen der Schweißnaht n	Schweißfacharbeiter	manuelle Schweißausrüstung
Inspektion der Schweißnaht n	Schweißfacharbeiter	Optische Prüfung durch Experte
Dokumentation der Schweißnaht n	Schweißfacharbeiter	Papierprotokolle (Laufzettel)
Schweißparameter auswählen n+1	Schweißfacharbeiter	manuelle Schweißausrüstung
Ermitteln der Vorzugslage n+1 (laut WPS)	Schweißfacharbeiter	Schweißvorschrift (WPS)
Positionieren der Baugruppe n+1	Schweißfacharbeiter	Spannsysteme für Positionierung
ggf. passive Prozessgase einleiten n+1	Schweißfacharbeiter	keine Hilfsmittel erforderlich
ggf. Abdichtung entfernen n+1	Schweißfacharbeiter	keine Hilfsmittel erforderlich
ggf. Anpassung der Schweißnaht n	Schweißfacharbeiter	Vermessen und Dokumentieren
ggf. Dokumentation der Anpassung n	Schweißfacharbeiter	Papierprotokolle (Laufzettel)
Setzen der Schweißnaht n+1	Schweißfacharbeiter	manuelle Schweißausrüstung
Inspektion der Schweißnaht n+1	Schweißfacharbeiter	Optische Prüfung durch Experte
Dokumentation der Schweißnaht n+1	Schweißfacharbeiter	Papierprotokolle (Laufzettel)
...		
Reinigen der Schweißbaugruppe	Schweißfacharbeiter	Tauchbad, Politur
Kontrolle der geforderten Produktqualität	Schweißfacharbeiter Schweißfachingenieur	Mess- und Prüfmittel

## Liste der veröffentlichten Teilergebnisse

Müller, Rainer & Vette, Matthias & Blum, Anne & Burkhard, Dirk & Dietz, Thomas & Drieß, Miriam & Geenen, Aaron & Hörauf, Leenhard & Mailahn, Ortwin & Masiak, Tobias & Verl, Alexander. (2019). Methoden zur erfolgreichen Einführung von MRK. 10.3139/9783446453760.007.

Müller, Rainer & Franke, Jörg & Henrich, Dominik & Kuhlenkötter, Bernd & Raatz, Annika & Verl, Alexander & Vette, Matthias & Geenen, Aaron & Blum, Anne & Drieß, Miriam & Burkhard, Dirk & Hörauf, Leenhard & Mailahn, Ortwin & Masiak, Tobias & Metzner, Maximilian. (2019). Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration.

Müller R, Vette M, Geenen A, et al. (2018) Development of a Human-Robot-Collaboration System using the Example of a Riveting Process in Aircraft Assembly. J Robotics Autom 2(1):69-77.

Müller, Rainer & Vette, Matthias & Geenen, Aaron. (2017). Skill-based Dynamic Task Allocation in Human-Robot-Cooperation with the Example of Welding Application. Procedia Manufacturing. 11. 13-21. 10.1016/j.promfg.2017.07.113.

R. Müller; M. Vette; A. Geenen, "Sealing process on a large floor grid crossbeam assembly by human-robot-cooperation", IFAC, 2017

Müller, Rainer & Vette, Matthias & Geenen, Aaron & Masiak, Tobias. (2017). Improving Working Conditions in Aircraft Productions using Human-Robot-Collaboration in a Collaborative Riveting Process. 10.4271/2017-01-2096.

Kanso, Ali & Masiak, Tobias & Müller, Rainer & Vette, Matthias & Geenen, Aaron. (2017). Methodology for design of mechatronic robotic manipulators based on suitability for modern application scenarios. International Federation of Automatic Ccontrol - PapersOnLine. 50. 12727-12733. 10.1016/j.ifacol.2017.08.1825.

Maurtua, Iñaki & Pedrocchi, Nicola & Orlandini, Andrea & Fernández, José & Vogel, Christian & Geenen, Aaron & Althoefer, Kaspar & Shafti, Ali. (2016). FourByThree: Imagine humans and robots working hand in hand. 1-8. 10.1109/ETFA.2016.7733583.

Geenen, Aaron & Masiak, Tobias. (2016). Designing a new generation of modular, flexible and collaborative robots. Online verfügbar unter <http://fourbythree.eu/designing-a-new-generation-of-modular-flexible-and-collaborative-robots/>, zuletzt geprüft am 27.04.2019.

Müller, Rainer; Vette, Matthias; Geenen, Aaron. (2015): Potentials of Human-Robot-Cooperation in Aircraft Assembly Systems. In: SAE International Paper 2015, 15.09.2015. Online verfügbar unter <http://papers.sae.org/2015-01-2507/>, zuletzt geprüft am 27.04.2019.

Müller, Rainer; Vette, Matthias; Geenen, Aaron (2015): Erfahrungen der Werker übertragen. Roboter. In: handling 2015 (09/2015), S. 80–81. Online verfügbar unter <http://www.handling.de/robotertechnik/displayaction-347942.htm>, zuletzt geprüft am 27.04.2019.

Müller, Rainer; Vette, Matthias; Geenen, Aaron (2015): Potentiale der Mensch-Roboter-Kooperation in der Flugzeugproduktion. Bedarfsgerechte, angepasste, temporäre Automatisierung. In: wt Werkstattstechnik online 2015 (9-2015), S. 614–618. Online verfügbar unter [http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data\[article\\_id\]=84288](http://www.werkstattstechnik.de/wt/article.php?data[article_id]=84288), zuletzt geprüft am 27.04.2019.



## **Im Rahmen der Dissertation betreute wissenschaftliche Arbeiten**

Chiranjit, Roy (2017): Dynamic optimization for robot based mechanical processes. Master thesis. Universität des Saarlandes. Faculty of Natural Sciences and Technology I. Department of Computer Science

Hauser, Simon (2014): Entwicklung eines Modells zur Evaluierung des wirtschaftlichen Nutzens von Prozess-Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen. Masterarbeit. UdS. Airbus Operations GmbH.